Spektrum DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

SERIE
ARCHÄOLOGIE IN WESTAFRIKA
TEIL 1:
DIE NOK-KULTUR

Spektrum DER WISSENSCHAFT
7/08
JULI 2008

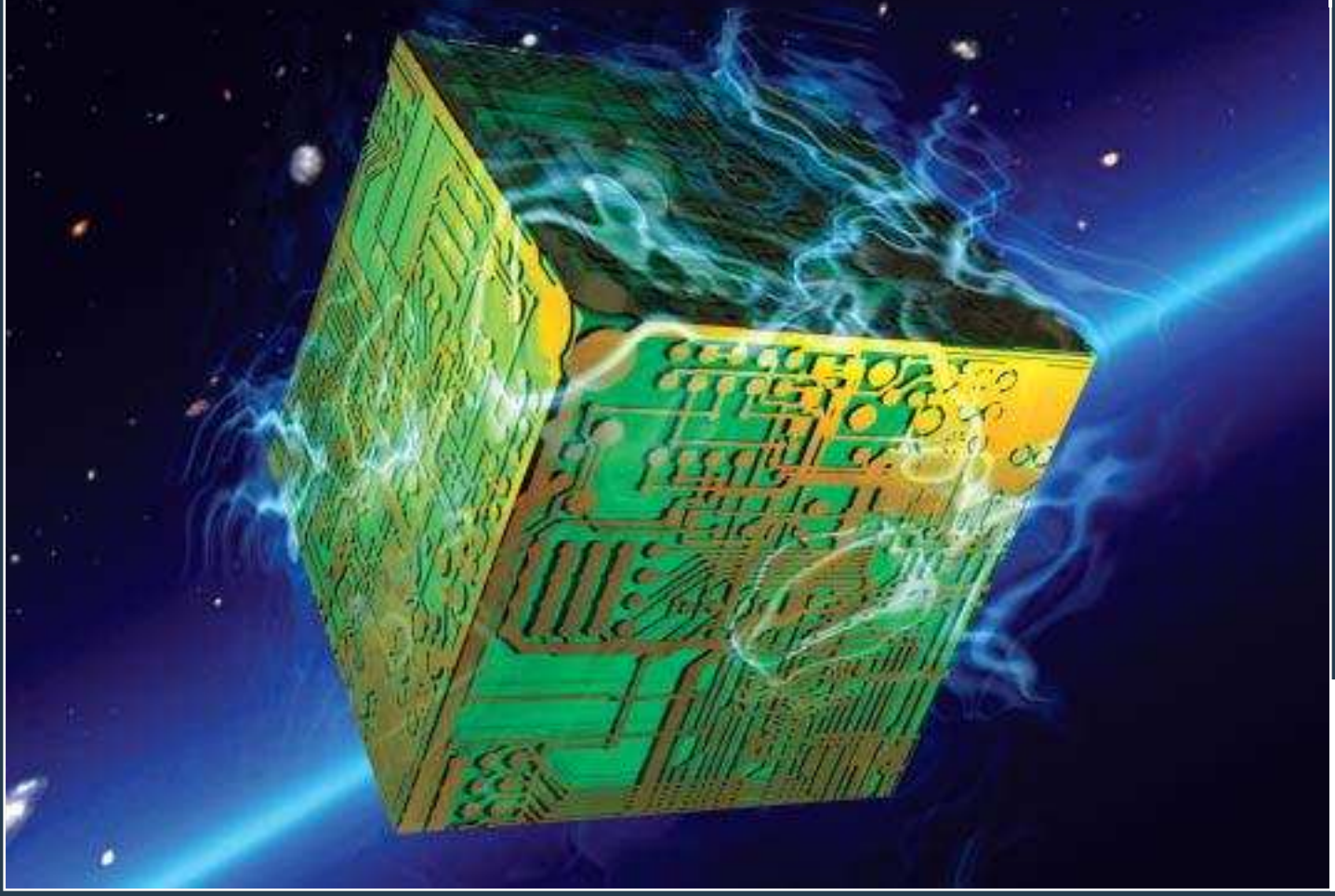
SUPERTELESKOP LOFAR
Blick in die dunkle Ära des Kosmos

MEDIZIN
Fördert Vitamin-D-Mangel Krebs oder Diabetes?

TUNGUSKA-METEORIT
Neues vom rätselhaften Einschlag vor 100 Jahren

Die Grenzen der Quantencomputer

Die Wunderrechner werden unglaublich schnell sein – aber keineswegs alles besser können



7,40 € (D/A) · 8,– € (L) · 14,– sFr.
D6179E
4 194058 407402 07

www.spektrum.de

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wettläufe gegen Banditen und Raubgräber

Die Zeit: 500 Jahre v. Chr. Im Land der Kelten schickt sich die La-Tène-Generation an, das Erbe der Hallstatt-Kultur zu übernehmen. In Rom wird das Amt des Volkstribuns geschaffen, um künftig die Interessen der Plebejer zu vertreten. Und der Konflikt zwischen dem persischen Großreich und Griechenland eskaliert, wird 490 v. Chr. in der Schlacht bei Marathon einen ersten Höhepunkt erleben. Die Antike, wie wir sie in unseren Schulbüchern finden, war im Umbruch. Wer fragt da schon nach Afrika? Wer würde mit dem Schwarzen Kontinent wichtige Stationen menschlicher Kulturentwicklung verbinden, von Ägypten einmal abgesehen? Der Philosoph Friedrich Hegel nannte ihn gar geschichtslos. Dass er irrte, wissen inzwischen nicht nur Anthropologen – in Ostafrika stand die Wiege der Menschheit, und dort entwickelte sich der *Homo sapiens*. In den letzten Jahren entdeckten auch Archäologen bei Grabungskampagnen in Westafrika Überraschendes: die ältesten Keramiken der Welt, Zeugnisse unerwartet früher Eisenproduktion bereits um 500 v. Chr. und Kunstwerke, die wohl nur komplexe Gesellschaften hervorbringen können.

Wir greifen einige Themen aus diesem spannenden Forschungsgebiet jetzt **in einer dreiteiligen Serie** auf (S. 64). Den Anfang machen in dieser Ausgabe die Frankfurter Archäologen Peter Breunig und Nicole Rupp (Foto), die in Nigeria bereits seit einigen Jahre brachliegendes Forschungsgebiet beackern: die so genannte Nok-Kultur, benannt nach dem ersten Fundort in Zentralnigeria im Jahr 1928. Aufsehen erregte Breunig bereits vor zehn Jahren, als er im Tschad das älteste Boot Afrikas entdeckte.

MIT FRDL. GEN. VON PETER BREUNIG

Archäologen Nicole Rupp und Peter Breunig in Nigeria mit einer Terrakotta-Figur der Nok-Kultur

Manches hat sich vom Alltag der Menschen aus der Nok-Kultur erhalten, bekannt aber sind vor allem ihre kunstfertigen Terrakotten. Die haben leider längst auch das Interesse des internationalen Kunstmarkts gefunden: Raubgräber zerstören eine Fundstätte nach der anderen. Die deutschen Wissenschaftler und ihre nigerianischen Partner versuchen zu retten, was zu retten ist. Dabei ist Archäologie in Nigeria keine leichte, oft sogar eine gefährliche Arbeit. Ein guter Kontakt zu Behörden und deutschen Firmen im Land ist lebenswichtig. Der direkte Draht zur Bevölkerung spielt den Forschern auch manchen Zufallsfund in die Hände, wie **Peter Breunig im Interview** auf S. 69 berichtet. So graben die Frankfurter in Afrika oft unter widrigen Umständen und im Wettlauf gegen die Zeit – »eine Herausforderung«.

SCALA, FLORENZ / MUSEE DU QUAI BRANLY

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

INHALT

JULI 2008

48

MEDIZIN & BIOLOGIE
Warum Hunde so verschieden sind

26

ASTRONOMIE & PHYSIK
Blick in den jungen Kosmos mit dem Großteleskop LOFAR

40

MEDIZIN & BIOLOGIE
Vielseitiges Vitamin D

56

ERDE & UMWELT
Tunguska-Explosion: Einschlagkrater gefunden?

AKTUELL

12 Spektrogramm
Verschleierte Galaxien · Erste Amerikaner aßen Algen · Laufstarke Flugechsen · Beinahe-Aus nach Trennung · Jupiters langer Schatten u. a.

15 Bild des Monats
Blitze aus der Asche

16 Chaos in Planktongemeinschaften
Schwankungen in Planktonpopulationen zeigen chaotische Muster

19 Der Östrogen-Blues 🔊
Hormonähnliche Substanzen in Abwässern machen Stare zu Gesangskünstlern

20 Nach dem Kupfer die Eisenzeit? 🔊
Ein neu entdeckter Hochtemperatursupraleiter auf Eisenbasis weckt große Hoffnungen

22 Nanogel gegen Krebs 🔊
Kapsel mit Köder für Tumorzellen setzt nur genau tödliche Giftdosis frei

24 Springers Einwürfe
Wie natürlich ist der Logarithmus?

ASTRONOMIE & PHYSIK

26 ▶ Großteleskop LOFAR
Mit einem digitalen Riesenteleskop, das halb Europa überdeckt, spähen Radioastronomen bald in die Tiefen – und damit die Frühzeit – des Weltalls

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

36 Noahs Arche, Erdbeben und die Staatsverschuldung
Logarithmische Skalen tragen – bei aller Nützlichkeit – gelegentlich zu drastischen Verharmlosungen bei

MEDIZIN & BIOLOGIE

40 ▶ Unterschätztes Sonnenvitamin
Vitamin D kann viel mehr als Knochen stärken. Fördert ein Mangel daran tödliche Krankheiten wie Krebs?

48 Die Vielfalt der Hunde
Die Genetik beweist: Hunde bilden viele getrennte Rassen. Deren Krankheiten helfen, Hintergründe menschlicher Erbleiden aufzudecken

Titelmotiv: Phil Saunders, Space Channel

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet; die mit 🔊 markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: www.spektrum.de/audio

WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial: Wettläufe gegen Banditen und Raubgräber
8 Leserbriefe
9 Impressum
63 Im Rückblick
106 Vorschau

100 Rezensionen:
Paul Davies *Der kosmische Volltreffer*
Tor Bomann-Larsen *Amundsen*
Valerio Scarani *Physik in Quanten*
Daniel Dennett *Süße Träume*

TITELTHEMA

Die Grenzen der Quantenrechner 90

64

MENSCH & GEIST

Prähistorische Kunst in Afrika

ERDE & UMWELT

56 ▶ **Tunguska-Rätsel bald gelöst?**
Warum kam es am 30. Juni 1908 zu einer riesigen Explosion in Zentralsibirien? Forscher stießen kürzlich auf Hinweise in einem merkwürdigen See

SERIE ARCHÄOLOGIE IN WESTAFRIKA
64 ▶ **Das Rätsel der Nok-Kultur**
Nigerias 2000 Jahre alte Tonstatuen zeugen von komplexen Gesellschaftsstrukturen im frühen Afrika

MENSCH & GEIST

PORTRÄT
74 **Bernulf Kanitscheider**
Der Wissenschaftsphilosoph über den Konflikt der zwei Kulturen

JUNGE WISSENSCHAFT
80 **Jugend forscht**
Bundeswettbewerb 2008 in Bremerhaven

ESSAY
84 **Warum wir sterben**
Unser Leben ist endlich. Über den Grund gibt es viele Theorien – welche ist richtig?

TECHNIK & COMPUTER

TITEL
90 **Grenzen der Quantencomputer**
Die futuristischen Wunderrechner werden allgemein überschätzt. Nur bei speziellen Berechnungen sind sie heutigen Computern klar überlegen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG
98 **Scharfer Blick in den Körper**
Der Röntgenfilm hat ausgedient, digitale Bildverarbeitung hält Einzug in Praxen

Energie aus der Natur

e·on
Neue Energie

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf **www.spektrum.de**. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

ANGELIKA SCHWENGERS

INTERAKTIV Und die Gewinner sind ...!
www.spektrum.de/mathekunst

LI-FLUSS: WILT / FOTOLIA; KONFUZIUS: INCREA / FOTOLIA; BEARBEITUNG: EPOC

FÜR ABONNENTEN »Was du nicht willst, das man dir tu ...«
www.spektrum-plus.de

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Genetische Arche Noah

Maus, Mücke, Mensch – die Liste der Spezies, deren Genom inzwischen entziffert wurde, ist lang. Und ständig kommen neue Arten hinzu, die ihr Erbgut preisgeben. **spektrumdirekt** hält Sie auf dem Laufenden:
www.spektrumdirekt.de/genom

Quantenbits und -bytes

Immer kleiner wird die elektronische Welt der Bits und Bytes. Am Ende dieser Entwicklung könnte der erhoffte Quantencomputer stehen. Noch ist er Zukunftsmusik, gleichwohl erzielen Forscher bei der Informationsverarbeitung auf Teilchenebene immer neue Erfolge
www.spektrumdirekt.de/quanten

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Wissensration in eleganter Kürze

Von Meistern im Genklau, über das Gedankenlesen per Computer bis hin zu Nanotüchern für Ölteppiche: Hier finden Sie unsere »Spektrogramme«, die nur in einer Auswahl im Heft erscheinen und die Sie kurz und prägnant über die interessantesten Neuigkeiten aus der Welt der Wissenschaft informieren – komplett!
www.spektrum.de/spektrogramm

Traumberuf Hirnforscher

So mancher angehende Student würde gern Karriere in der »Hirnforschung« machen. Nur leider: Dieses Fach wird nirgendwo angeboten. Hier zeigen unsere Kollegen von **Gehirn&Geist**, wie man mit einer klugen Auswahl von Studiengängen trotzdem ans Ziel gelangt
www.gehirn-und-geist.de/studieren

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Ist Doping eine gute Idee?

Gehen Sie (online) wählen: Wieder schlagen wir fünf Themen vor und präsentieren im Oktoberheft Ihren Wunschartikel. Neben der Frage, wie Sportler dem Konkurrenzdruck begegnen können, stehen zur Wahl: Zweifel an der ägyptischen Chronologie, Vertrauen schaffende Hormone, Gehirnwachstum durch geistige Erfahrung und Nuklearschmuggel!
www.spektrum.de/artikel/958311

Und die Gewinner sind ...!

Selbst nach Einsendeschluss erreichen uns immer noch spektakuläre Bilder und Filme, die unsere Leser(innen) mit der Software »Surfer« für algebraische Flächen erstellt haben. Aus Hunderten von Arbeiten hat die Jury nun die Gewinnerwerke gekürt
www.spektrum.de/mathekunst

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Was du nicht willst, das man dir tu ...«

Die Weisheiten des Konfuzius waren unter Mao verpönt. Nun scheint eine Renaissance angebrochen: Konfuzianismus als philosophisches Rüstzeug für die Globalisierung

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

www.spektrum.de
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

FREIGESCHALTET

*Ausgewählte Artikel aus **Gehirn&Geist** und **Sterne&Weltraum** kostenlos online lesen*

»Justitias neue Kleider«

Blüht unserem Rechtssystem eine Neuro-Revolution? Werden bald »gefährliche Gehirne« aus dem Verkehr gezogen – statt Personen zur Verantwortung? Können Hirnscans helfen, Verdächtige einer Straftat zu überführen oder ihre Schuldfähigkeit zu klären? Szenarien wie diese gibt es viele – doch einer näheren Prüfung halten sie (noch) nicht stand

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/957683

»›Posthume‹ Analyse einer galaktischen Supernova«

Lichtechos ermöglichen erstmals die spektroskopische Untersuchung einer Supernova in unserem Milchstraßensystem und klären das Rätsel der Herkunft von Cassiopeia A

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **STERNE&WELTRAUM** UNTER

www.astronomie-heute.de/artikel/957966

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Netztagebücher von Fußball bis Reproduktionserfolg

Metin Tolan kommentiert die Fußball-Europameisterschaft in physikalischer Hinsicht (www.wissenslogs.de/wblogs/blog/querkraft), die »Klimawette« wird weiterhin heiß diskutiert (www.wissenslogs.de/wblogs/blog/klimalounge), und neu dabei in diesem Monat ist Stefan Ohm, der in seinem GEO-LOG aktuelle Nachrichten aus geografischer Perspektive aufgreift. Oder wollen Sie lieber wissen, ob Religiosität den Reproduktionserfolg beeinflusst (www.wissenslogs.de/wblogs/blog/natur-des-glaubens)? Diskutieren Sie mit – über diese Themen und viele mehr!

www.wissenslogs.de
www.scilogs.de

Für Sie machen wir weltweit viel Wind.

Für den Einsatz von Erneuerbaren Energien engagieren wir uns weltweit. So gehen wir zum Beispiel überall dorthin, wo wir die Kraft des Windes für Sie nutzen können – auch ins Wasser: Vor der Küste Englands betreibt E.ON bereits einen Offshore-Park mit 30 Windanlagen, der rund 33.000 Haushalte mit Energie versorgen kann. Und in Deutschland entsteht „Alpha Ventus" – der erste Windpark der Welt, der von uns auf dem offenen Meer errichtet wird. Das ist eine große Herausforderung – denn die Windanlagen werden 45 km vor Borkum unter rauen Hochsee-Bedingungen in 30 Meter tiefem Wasser installiert. Ob Meer oder Land: wir sind an vielen Orten Europas und in Nordamerika für Sie bereits hart am Wind. Und in Zukunft sollen es noch mehr werden.
Ein weltweites Engagement in Erneuerbare Energien, das uns allen zugutekommt.

Mehr zu unserem Engagement in Erneuerbare Energien erfahren Sie unter www.eon.com

e·on
Neue Energie

Energieversorgung in Zeiten des Klimawandels April 2008

Wandel zu nachhaltiger Energieversorgung

Anstatt den längst überfälligen Wandel hin zu einer nachhaltigen Energiepolitik unmittelbar zu fordern, lässt Herr Kleinknecht die in meinen Augen einzig zukunftsfähigen regenerativen Energien als für die nächsten Jahrzehnte nicht realisierbar und konkurrenzfähig links liegen und erörtert im Folgenden die Nachteile einer modifizierten, nicht zukunftsfähigen konventionellen Erzeugungsform gegenüber einer überholten zweiten nicht zukunftsfähigen Form der Stromerzeugung.

Des Weiteren erscheint mir die Gegenüberstellung von hochsubventioniertem regenerativ erzeugtem Strom einerseits und billigem Atomstrom andererseits angesichts der enormen Subventio-nen, die seit 50 Jahren in die Kernkraftindustrie fließen, etwas unfair. Natürlich ist ein grundlegender Wandel zu einer nachhaltigen Energieversorgung aus regenerativen Energieformen eine gewaltige Herausforderung, aber angesichts seiner unausweichlichen Dringlichkeit sollte man ihn nicht einfach kurzfristig über Bord werfen.

Es gibt alternative Vorstellungen zu 80 000 Windrädern: Den Energiebedarf durch Einsparungen in allen Bereichen erst einmal heruntergeschraubt, ist eine Versorgung durch einen breit gefächerten Mix aus dezentralen Windkraft-, Geothermie-, Solarthermie-, Biomasse-, Wasserkraft- und Fotovoltaikanlagen in Kombination mit kleinen Gaskraftwerken mit Kraft-Wärme-Kopplung durchaus schon eher vorstellbar.

Und man sollte bedenken: Jede Investition in eine nicht zukunftsfähige Art der Energieerzeugung – und dazu zählt auch die Laufzeitverlängerung der AKWs – verzögert diesen notwendigen Wandel hin zu einer nachhaltigen Versorgung mit 100 Prozent regenerativen Energien.

Julian Maguhn, Freising

Antwort des Autors Prof. Konrad Kleinknecht:

Ich unterstütze den Ausbau der erneuerbaren Energiequellen; natürlich wird auf ganz lange Sicht dieser Übergang geschehen. Aber was Sie falsch verstanden haben: Hier geht es um das ganz konkrete von der Politik angesteuerte Ziel, die CO_2-Emissionen in Deutschland bis 2020 um 30 Prozent zu senken. Und da stelle ich nüchtern fest, dass dieses Ziel nicht erreicht werden kann, wenn man die Kernkraftwerke abschaltet und ihre Stromerzeugung notwendigerweise aus neuen Kohlekraftwerken beziehen muss, ohne die alten abzuschalten. Denn die

Kohlendioxid-Ausstoß in Deutschland

Gegenwärtig werden pro Jahr weltweit 28 Gigatonnen CO_2 durch den Verbrauch fossiler Brennstoffe ausgestoßen. Der Anteil Deutschlands an der globalen CO_2-Freisetzung beträgt gegenwärtig 3,2 Prozent oder in absoluten Zahlen 880 Megatonnen pro Jahr. Wenn es gelingt, den CO_2-Ausstoß um 40 Prozent zu senken, wie es unser übereifriger Umweltminister Gabriel wünscht, wären das 320 Megatonnen weniger pro Jahr. Die erfolgreiche Umsetzung der Pläne der Bundesregierung (30 Prozent weniger) würden die deutschen CO_2-Emissionen um 264 Megatonnen pro Jahr verringern.

Wie lange wird es wohl dauern, bis die stark wachsende Wirtschaft in China und Indien den eingesparten deutschen Anteil mehr als wettgemacht haben wird? Es sei daran erinnert, dass allein in China im Jahr 2006 174 Kohlekraftwerke neu ans Netz gegangen sind und in 2007 noch zirka 120 weitere. Vermutlich wird es weniger als ein Jahr dauern, dann haben allein diese beiden Länder ihren CO_2-Ausstoß um die Menge erhöht, die unser Land bis zum Jahr 2020 einsparen will. Diese Relation zeigt doch den ganzen Irrsinn der politischen Vorgabe. 30 oder 40 Prozent weniger »deutsches« CO_2 ist im Weltmaßstab einfach lächerlich wenig! Schon jetzt gibt es kaum ein Land, in dem sparsamer und effizienter mit Energie umgegangen wird als unseres: Die deutschen Kernkraftwerke sparen zirka 160 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr ein. Wenn nach deren Abschaltung die Stromversorgung gesichert werden soll, müssen rechtzeitig neue Kraftwerke gebaut werden, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Wind und Sonne können auch bei großzügigsten Subventionen nur einen Bruchteil des bisher von Kernkraftwerken erzeugten Stroms ersetzen.

Dr. Armin Quentmeier, Dortmund

Endlagerung abgebrannter Brennelemente

So löblich und auch unbedingt notwendig die Kritik an der CO_2-Endlagerung ist, vielleicht wäre auch ein Satz zu der unklaren Situation der Endlagerung im Kernkraftbereich sinnvoll gewesen, und wenn nur, um eine Ausgewogenheit der Betrachtung zu ermöglichen.

Martin Grün, Neckarsulm

Antwort des Autors:

Gerne füge ich eine Bemerkung zur Endlagerung der abgebrannten Brennelemente an, die Sie vermisst haben: Das Endlager für CO_2 ist die Atmosphäre oder vielleicht (irgendwann) der Untergrund in Norddeutschland.

Die Menge von CO_2 ist 400 Millionen Tonnen pro Jahr, die Menge von Uranrückständen 400 Tonnen pro Jahr. Der Salzstock Gorleben wurde vor 30 Jahren als bester Standort bestimmt, der Salzstock besteht seit 70 Millionen Jahren unverändert, das Gestein ist hart, es hält 200 Bar Druck aus. Die Eignung des Endlagers Gorleben wäre längst bekannt, wenn nicht der Minister Trittin

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter www.spektrum.de auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Heftarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Frau Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg (Deutschland)
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

erneuerbaren Energien können bis 2020 höchstens 20 Prozent unseres Stroms erzeugen, selbst mit großen Milliarden-Subventionen, und auch wenn Sie die ganze Liste Ihrer Vorschläge verwirklichen könnten.

Es geht um die konkreten Zahlen, und da wird in den zwölf Jahren, die uns bis dahin bleiben, weder die Fotovoltaik (jetzt 0,4 Prozent) noch die Geothermie (jetzt etwa sechs Megawatt Leistung, also im Zehntel-Promille-Bereich) noch die Kraft-Wärme-Kopplung etwas ändern können, leider!

Deshalb brauchen wir als Brückenenergie die Kernenergie für die nächsten 30 Jahre, um den Jahrzehnte dauernden Prozess des Übergangs zu den erneuerbaren möglich zu machen.

Antwort des Autors:
Ihrem Kommentar kann ich voll zustimmen, nur ein kleines Caveat: die »führende Rolle Deutschlands beim effizienten Umgang mit Energie«. Die ist leider durch die CO_2-Bilanz getrübt, weil wir überwiegend die klimaschädliche Kohle verfeuern. Und wenn wir tatsächlich irrational die Kernkraftwerke durch Kohlekraftwerke ersetzen, sind wir kein Vorbild mehr, selbst wenn wir 0,5 Prozent des Stroms aus Fotovoltaik erzeugen. Wir bleiben dann das Schlusslicht in der CO_2-Bilanz europaweit.

im Jahr 2000 die Untersuchung gestoppt hätte, zu der er verpflichtet ist. Es spielt für das Endlager keine große Rolle, ob die Rückstände von 30 oder von 50 Jahren Betrieb eingelagert werden müssen.

Conclusio: Das Risiko des Klimawandels mit seinen sozialen Folgen, Bevölkerungswanderungen und möglicherweise Kriegen ist schlimmer als die Einlagerung einer vergleichweise kleinen Menge abgebrannter Brennstäbe im Salzstock.

ANDRES RODRIGUEZ / FOTOLIA

Materielles allein reicht nicht zum Glücklichsein

Macht Geld glücklich?, Mai 2008

Ist es nicht etwas zu kurz gegriffen und monokausal argumentiert, das Glücklichsein nur an der materiellen Ebene festzumachen?

Meines Erachtens sind doch, um beim Beispiel des materiellen Einkommens zu bleiben, damit auch ziemliche Unannehmlichkeiten verbunden, wie weniger freie Zeit zur Verfügung zu haben, mehr Stress und so weiter, die das individuelle Wohlbefinden mehr oder weniger stark einschränken. Gerade diese Aspekte, in einem eigentlich psychologisch orientierten Artikel, außer Acht zu lassen, beleuchtet mir zu wenig. Schade drum.

Bernhard Kauler, Würzburg

Antwort des Autors Dr. Edgar Dahl:
Sie haben vollkommen Recht, dass das Geld nur einer von vielen Aspekten des menschlichen Glücks ist. In dem Essay ging es aber ausschließlich um das »Wohlstandsparadox«, also um die Frage, warum wir trotz eines weit höheren Lebensstandards kein größeres Glück empfinden. Ich bin im »Spektrum Talk« kurz auf die Frage eingegangen, was denn nun wirklich zu unserem Glück beiträgt.

Geld kann in erster Linie zu einem »angenehmen Leben« beitragen. Doch in Saus und Braus zu leben, macht offenbar nur wenige von uns wirklich glücklich. Der Mehrzahl erscheint es schon nach kurzer Zeit als fade und öd. Um wirklich glücklich zu sein, bedürfen die meisten von uns auch eines »guten Lebens«, also der Anerkennung und des Respekts unserer Freunde und Kollegen, und eines »sinnvollen Lebens«, also des Gefühls, sein Leben einer wertvollen Sache gewidmet zu haben.

Ich halte das »sinnvolle Leben« für den wichtigsten Aspekt eines glücklichen Lebens. Friedrich Nietzsche schrieb daher einmal treffend: »Wer ein ›warum?‹ des Lebens hat, erträgt fast jedes ›wie?‹.«

Mögliche Fakten statt paralleler Welten

Die Parallelwelten des Hugh Everett, April 2008

Die Idee des »multiplen Universums« verspricht viel und hält wenig. Die Einbeziehung des Messapparats in die quantentheoretische Beschreibung ist naheliegend und wurde schon von J. von Neumann (1932) verfolgt.

Das resultierende Messproblem der Quantentheorie besteht im Kern darin, dass die lineare Struktur des Hilbertraums (quantenmechanische Möglichkeiten) mit den eindeutigen Ergebnissen jeder Messung (klassische Fakten) nicht übereinstimmt.

Dieses Problem wird man gerade bei universeller Anwendung der Quantentheorie nicht los. Zudem lassen sich alle Aussagen von »kopenhagenerisch« in »multiversisch« übersetzen. Wer statt »Eine Möglichkeit wurde realisiert, und die anderen sind weggefallen« sagt: »Unser Universum hat sich geteilt, und wir sehen nur einen Zweig«, der liefert nicht mehr als ein fantasieanregendes Erklärungsplacebo. Denn Universenteilung ist nicht leichter zu verstehen als Faktenentstehung. Schon gar nicht kann sie »aus den Gleichungen selbst« abgelesen werden. Letztlich werden hier einfach nicht realisierte Möglichkeiten mit fernen Wirklichkeiten verwechselt.

Mein hartes Fazit: Everetts Ansatz wurde nicht damals zu Unrecht ignoriert, sondern er wird heute zu Unrecht hofiert.

Helmut Fink, Nürnberg

Ablösung der alten Holzwirtschaft

Amerikas Weg ins solare Zeitalter, März 2008

Vor rund 200 Jahren auf dem Weg zur industriellen Revolution kennzeichnete Europa eine Land- und Forstwirtschaft, die von einer Übernutzung der Ressourcen geprägt war, und eine Metall- und Energiewirtschaft, welche zumeist existenziell auf die Nutzung von Holz angewiesen war.

Was wäre aus diesem Aufbruch geworden, wenn nicht ein wesentlicher Bestandteil die Ablösung der alten Holz- und Holzkohlewirtschaft von einer moderneren Wirtschaft auf Grundlage von Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Erdöl und später auch Atomenergie gewesen wäre? Eine Aufgabe, welche unsere historischen Vorfahren zu lösen hatten und mit Hilfe der überwiegend fossilen Energiequellen beantworteten.

Auf ihren Schultern steht unsere Generation. Wir haben eine andere Aufgabe – Ressourcenschonung im Rohstoffsektor und Ablösung der jetzt veralteten, nicht mehr zeitgemäßen Energieformen durch nachhaltige, regenerative Energien. Scheitern wir daran, wird es global unausweichlich zu einem großflächigen Zusammenbruch unserer heutigen Lebensweise kommen. Können unsere jetzigen politischen und wirtschaftlichen Manager diese Wende vollbringen?

Historisch waren es beispielsweise Bergbauingenieure, welche ihren Teil zum Nachhaltigkeitsbegriff in der Forstwirtschaft beigetragen haben.

Andreas Wennemann, Bad Camberg

Mittel gegen Hepatitis-B-Erreger

Kein Zutritt für Hepatitis B, Spektrogramm, Mai 2008

Der kurze Beitrag ist sehr interessant, jedoch enthält er zwei wesentliche Fehler.

1. Das Forscherteam um Jörg Petersen, Maura Dandri (Hamburg) und Stephan Urban (Heidelberg) hat erfolgreich eine neuartige Wirksubstanz gegen Hepatitis-B-Virus in Mäusen untersucht. Da das Virus nur Lebergewebe von Menschen oder Primaten infiziert, war es nötig, in die Mäuse humanes Lebergewebe zu implantieren. Um die Abstoßung des menschlichen Lebergewebes durch die Maus zu unterbinden, mussten immundefiziente Mäuse verwendet werden. Naturgemäß zeigen diese Mäuse dann auch keine Immunabwehr gegen das Virus. Diese ist aber bei Maus, und auch Mensch, Voraussetzung für die Entstehung einer Hepatitis und der daraus resultierenden Gelbsucht. Die Tiere der unbehandelten Kontrollgruppe haben also nach Infektion das Virus zwar vermehrt, entwickelten aber keine Gelbsucht, wie fälschlich in dem Kurzbericht behauptet.

2. Sie schreiben: »Hepatitis B ist derzeit nur durch eine Lebertransplantation zu behandeln.« Seit knapp 30 Jahren wird Interferon zur Therapie der chronischen Hepatitis B mit nachweisbarem, wenn auch begrenztem Erfolg eingesetzt. Seit etwa zwölf Jahren gibt es Nukleosid- beziehungsweise Nukleotid-Analoga, die die reverse Transkriptase des Hepatitis-B-Virus und somit seine Replikation zum Teil sehr wirksam hemmen. Diese häufig eingesetzten Mittel können aber die Infektion, ähnlich wie bei HIV, nicht ausrotten, so dass es unter der notwendigen Dauertherapie zur Resistenzbildung kommen kann. Wegen dieser Problematik besteht weiterhin Bedarf an neuen Mitteln, insbesondere bei solchen Hepatitispatienten, die wegen einer fortgeschrittenen Leberzirrhose eine Lebertransplantation benötigen. Lipopeptide, die die Anheftung eines Virus an ihre Zielzelle hemmen, sind meines Wissens bislang nicht als Therapeutika verwendet worden. Insofern war es angebracht, dass Sie über diese wichtige Publikation berichtet haben.

Prof. Dr. W. H. Gerlich, Gießen

Erratum

Aliens auf der Erde?, März 2008

Im Bild S. 44 und im Text auf S. 46/47 ist der Ausdruck »rechts-/linksdrehend« durch »rechts-/linkshändig« zu ersetzen.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Margit Ritzka, Claus-Peter Sesín, Dr. Sebastian Vogel, Dr. Michael Zillgitt.

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01. 01. 2008.

Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2008 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon

Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.

PRESSE Fachhandel

MEDIZIN

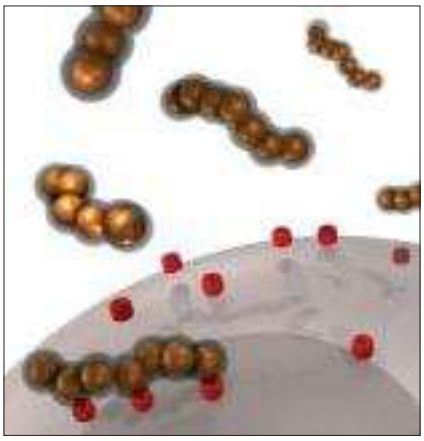
Nanowürmer gegen Krebs

■ Es erinnert an den Film »Die phantastische Reise«. Darin unternimmt ein U-Boot, auf mikroskopische Dimensionen geschrumpft, eine abenteuerliche Fahrt durch den Blutkreislauf eines Patienten, um ein Gerinnsel zu zerstören. Forscher um Michael Sailor von der University of California in San Diego haben nun künstliche Würmer aus Eisenoxidkügelchen gebaut, die durch die Blutgefäße zirkulieren, um Krebsgeschwüre aufzuspüren. Dazu sind sie mit Sonden bestückt, die sich an charakteristische Oberflächenstrukturen von Tumorzellen heften. Zur Verankerung dieser Sonden dient eine Kunststoffhülle um die Teilchen, die sich von dem zuckerartigen Biopolymer Dextran ableitet.

Hauptvorteil der Nanowürmer ist, dass sie wegen ihrer besonderen chemischen Zusammensetzung stundenlang im Blut zirkulieren, ohne abgebaut oder vom Immunsystem entfernt zu werden. Damit haben sie reichlich Zeit, ihr Ziel zu finden. Tatsächlich sammelten sie sich bei ersten Versuchen an Mäusen mit Krebs, wie gewünscht, in den Geschwulsten an.

Hinzu kommt, dass Eisenoxid superparamagnetisch und deshalb in Magnetresonanzaufnahmen leicht nachweisbar ist. So lassen sich auch schon sehr kleine Tumoren aufspüren, an die sich die Würmer angelagert haben. Die Forscher erhoffen sich davon eine verbesserte Frühdiagnose von Krebs. Außerdem denken sie daran, ihre Nanowürmer mit Antitumorwirkstoffen auszustatten und so direkt zum Kampf gegen die entarteten Zellen einzusetzen.

Advanced Materials, Bd. 20, S. 1630



JI-HO PARK, UC SAN DIEGO

Nanowürmer aus sechs bis acht Eisenoxidteilchen, die in ein Polymer gehüllt und mit speziellen Sonden (nicht gezeigt) versehen sind, lagern sich an Oberflächenstrukturen (rot) von Krebszellen an.

ARCHÄOLOGIE

Erste Amerikaner aßen Algen

■ Der steinzeitliche Lagerplatz Monte Verde in Südchile zählt zu den frühesten Besiedlungsspuren der Neuen Welt. Sein hohes Alter – es ist allerdings umstritten und liegt wohl zwischen 12 500 und 14 600 Jahren – wirft die Frage auf, wie die ersten Amerikaner, die nach gängiger Meinung gegen Ende der letzten Eiszeit über die damals trockengefallene Beringstraße aus Sibirien einwanderten, so schnell so weit nach Süden vordringen konnten. Eine Theorie besagt, dass sie sich – auch mit Booten – an der Küste entlangbewegten, wo sie kaum auf Hindernisse stießen.

Tom Dillehay von der Vanderbilt University in Nashville (Tennessee), der 1977 die ersten Ausgrabungen in Monte Verde durchführte, hat nun einen weiteren Beleg für diese These aufgetrieben. Er und seine Mitarbeiter entdeckten in der Fundstätte Überreste von verschiedenen Makroalgen: neben essbarem Seetang wie *Porphyra* und *Durvillaea antarctica* auch Meerespflanzen, die noch heute von der örtlichen Bevölkerung als Heilmittel verwendet werden. In einer Hütte fanden sich außerdem zerkaute Überreste vom Beerentang *Sargassum* sowie anderen ungenießbaren Arten, die offenbar eine rein medizinische Funktion hatten.

Diese Funde sind umso erstaunlicher, als der Siedlungsplatz etwa 15 Kilometer von einer Inlandsbucht entfernt lag; einige der Pflanzen kamen sogar von der damals mindestens hundert Kilometer entfernten Pazifikküste. All das belegt eine enge Beziehung der Bewohner zum Meer, die sich aus einer jahrhundertelangen Wanderung entlang der Küste erklären würde.

Science, Bd. 320, S. 784

TOM D. DILLEHAY, VANDERBILT UNIVERSITY

In dieser mutmaßlichen Medizinhütte fanden Archäologen zerkaute Reste von verschiedenen ungenießbaren Makroalgen, die offenbar Heilzwecken dienten.

SEISMOLOGIE

Beben triggern Beben

■ Ein Erdbeben entsteht, wenn sich Spannungen in der Erdkruste ruckartig lösen. Sind die Erschütterungen stark genug, lassen sie im näheren Umkreis Gebäude einstürzen oder rufen Erdrutsche hervor. Vom Bebenherd breiten sich zugleich Wellen aus, die Seismometer überall auf dem Globus registrieren. Sie pflanzen sich teils durch das Erdinnere fort, teils laufen sie an der Erdoberfläche entlang. Schon lange bestand der Verdacht, dass diese Wellen weit entfernt vom Epizentrum ihrerseits zur Entladung von Spannung führen und somit Erdstöße auslösen können. Die Datenlage war bisher jedoch unsicher.

Nun haben Forscher um Aaron Velasco von der University of Texas in El Paso diese Frage mit einer umfassenden Untersuchung geklärt. Für 15 Erdbeben zwischen 1992 und 2006 mit einer Stärke über 7,0 auf der Magnitudenskala analysierten sie die Aufzeichnungen von mehr als 500 Seismometern weltweit. Dabei zeigte sich, dass beim Eintreffen der zwei Typen von Oberflächenwellen selbst an weit vom Epizentrum entfernten Orten die Anzahl von Mikrobeben mit Magnituden unter vier deutlich zunahm. Für die zunächst ankommenden Love-Wellen betrug der Anstieg 37, für die nachfolgenden Rayleigh-Wellen sogar rund 60 Prozent.

Demnach kommt es in der Tat zum »dynamischen Triggern« schwacher Erdbeben durch seismische Wellen; schwere Erdstöße werden in der Regel allerdings nicht ausgelöst. Offen bleibt, worauf der Effekt beruht. Denkbar wäre, dass die Wellen verkeilte Gesteinsschichten lockern, so dass sie sich lösen können, bevor die Spannung einen kritischen Wert erreicht.

Nature Geoscience, Online-Vorabveröffentlichung

SAURIER

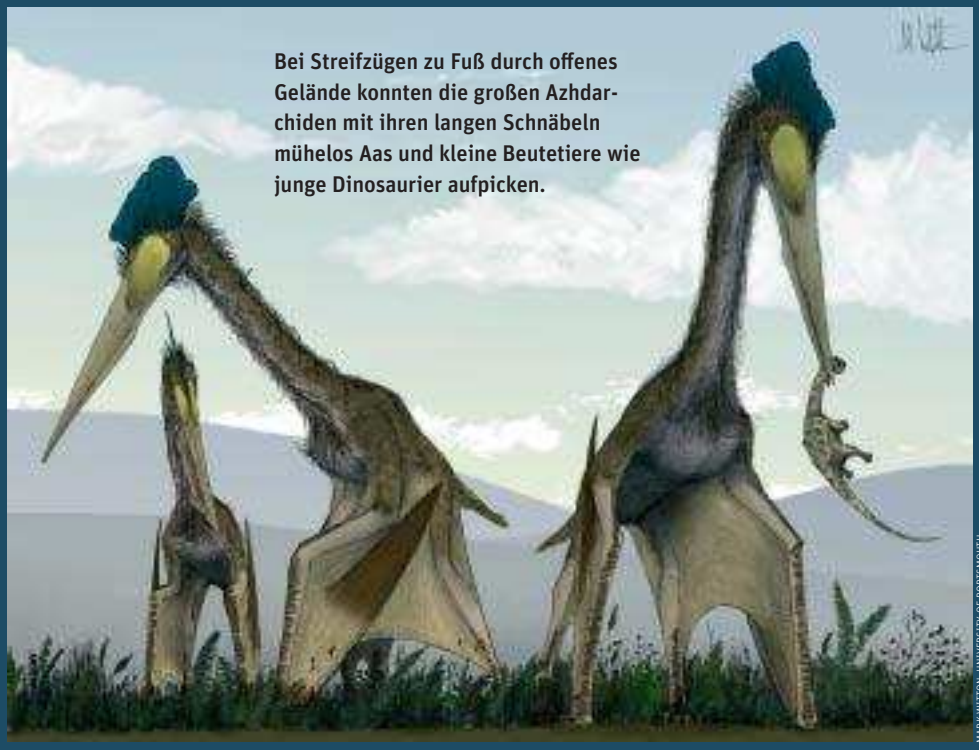
Flugechsen gut zu Fuß

■ Die Pterosaurier, geflügelte Verwandte von Krokodilen und Vögeln, beherrschten den Luftraum des Erdmittelalters. Wissenschaftler malten sich diese Echsen, die teils die Flügelspannweite kleinerer Flugzeuge erreichten und fünf Zentner wogen, bisher gern als Fisch fressende Luftakrobaten aus. Nun aber zeigen Untersuchungen von Mark Witton und Darren Naish von der University of Portsmouth (England), dass sich ausgerechnet die größten Vertreter am Boden offenbar wohler fühlten als in der Luft.

In Korea gefundene Fußspuren von Azhdarchiden, einer sehr artenreichen und weit verbreiteten Untergruppe der Flugechsen, deuten darauf hin, dass die Tiere ausgezeichnete Läufer waren. Zudem konnten sie, wie sich bei der Analyse ihrer biomechanischen Eigenschaften erwies, wegen ihrer ungewöhnlich steifen Wirbelsäule und dem langen Schnabel mit sehr wenig Energieaufwand Nahrung vom Boden greifen. Für andere Ernährungsweisen wie den Fischfang aus dem Flug war die Anatomie der Tiere dagegen kaum geeignet.

Die britischen Forscher vermuten daher, dass sich die Azhdarchiden, zu denen unter anderem der Gigant *Hatzegopteryx* mit seinem über zwei Meter langen Schädel gehörte, bevorzugt per pedes fortbewegten und Nahrung vom Boden aufsammelten. Darauf deuten auch die ungewöhnlich langen Gliedmaßen und die Verteilung der Fundstellen hin. Welche Nahrung die Tiere bevorzugten, ist allerdings nicht bekannt. Nach Ansicht von Witton und Naish dürften sie Aasfresser gewesen sein, aber auch lebende Beute nicht verschmäht haben.

PloS One, Bd. 3, e2271



Bei Streifzügen zu Fuß durch offenes Gelände konnten die großen Azhdarchiden mit ihren langen Schnäbeln mühelos Aas und kleine Beutetiere wie junge Dinosaurier aufpicken.

MARK WITTON, UNIVERSITY OF PORTSMOUTH

PLANETOLOGIE

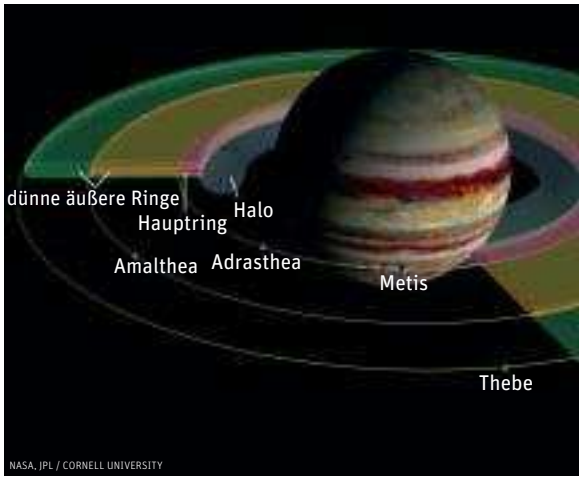
Jupiters langer Schatten

■ Wie erst 1979 die Raumsonde Voyager 1 entdeckte, hat außer Saturn auch Jupiter ein – wenngleich nur schwach ausgeprägtes – Ringsystem. Die Teilchen dort sind durch Zusammenstöße der kleinen inneren Gesteinsmonde mit Meteoriten entstanden und mit Durchmessern im Mikrometerbereich nur ungefähr so groß wie Partikel im Zigarettenrauch. Das zeigten Messungen der Raumsonde Galileo, die von 1995 bis 2003 durch das Jupitersystem flog und einige tausend Einschläge von Staubkörnern registrierte.

Erst jetzt haben Douglas P. Hamilton von der University of Maryland in Baltimore und Harald Krüger vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg die damaligen Daten akribisch analysiert und ausgewertet. Dabei erlebten sie einige Überraschungen. So ist das Ringsystem mit einem Durchmesser über 640 000 Kilometern sehr viel größer als bisher gedacht. Zudem bewegen sich einige Teilchen auf Bahnen, die bis zu 20 Grad gegen die Äquatorebene des Planeten geneigt sind.

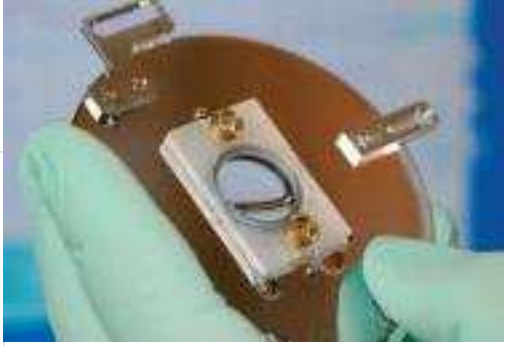
Die Forscher entdeckten aber nicht nur diese Besonderheiten, sondern konnten sie mit aufwändigen Computersimulationen auch erklären. Demnach spielt der Schatten von Jupiter für den Umfang des Ringsystems sowie die Größe und Bahnneigung der Teilchen in den äußeren Regionen eine bisher unterschätzte Rolle. Auf der Tagseite lädt die Sonnenstrahlung die Partikel durch Photoionisation positiv auf, während sie auf der Nachtseite wieder entladen werden. Das intensive Magnetfeld von Jupiter beeinflusst die Teilchen deshalb unterschiedlich stark, je nachdem, ob sie sich im Licht oder Schatten befinden. Dadurch werden kleine Körner nach außen getrieben und die kleinsten Partikel zusätzlich aus der Äquatorebene herauskatapultiert.

Nature, Bd. 453, S. 72



NASA, JPL / CORNELL UNIVERSITY

Das Ringsystem von Jupiter befindet sich im Bereich der Umlaufbahnen seiner vier kleinen inneren Gesteinsmonde, reicht nach neuesten Erkenntnissen aber weit darüber hinaus (nicht gezeigt).



GARY MEEK, GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

In einer solchen Flüssigkeitszelle führten US-Forscher mit dem Rasterkraftmikroskop Viskositätsmessungen an dünnen Wasserfilmen durch.

PHYSIK

Ein Hauch von Gel

■ Wasser, das in einen winzigen Raum gesperrt ist, zeigt einige bemerkenswerte Eigenschaften. Zum Beispiel kann man es mit elektrischen Feldern auch bei Zimmertemperatur gefrieren lassen. Jetzt haben Forscher durch Messungen mit dem Rasterkraftmikroskop gezeigt, dass sich sehr dünne Schichten aus Wasser oder dem Silikonöl Octamethylcyclotetrasiloxan eher wie zähe Gele verhalten als wie Flüssigkeiten.

Tai-De Li und Elisa Riedo vom Georgia Institute of Technology in Atlanta maßen die Relaxationszeit, die angibt, wie lange es dauert, bis sich eine Störung im Film wieder geglättet hat. Sie steigt, wie die Versuche ergaben, in Schichten mit bis zu etwa drei Moleküllagen – was bei Wasser einer Dicke von einem, beim Silikonöl von vier Nanometern entspricht – um mehrere Größenordnungen an.

Diese dünnen Filme verlieren nach Aussage der Wissenschaftler ihre hohe Viskosität jedoch wieder, wenn man die Flüssigkeit schüttelt. Sie ähneln demnach thixotropen Fluiden wie Ketschup, die sich durch Scherkräfte verflüssigen. Von ihrer Konsistenz und Struktur her erinnern sie an stark unterkühltes Wasser bei etwa –100 Grad Celsius.

Physical Review Letters, Bd. 100, S. 106102

URMENSCHEN

Beinahe-Aus nach Trennung

■ Die Urmutter aller heutigen Menschen lebte vor rund 200 000 Jahren in Ostafrika. Doch bevor *Homo sapiens* die Erde eroberte, war er 100 000 Jahre lang in zwei geografisch getrennte Populationen aufgespalten. Das schließen Wissenschaftler aus vergleichenden Analysen der mitochondrialen DNA, die über die mütterliche Linie vererbt wird, in verschiedenen Regionen Afrikas. Wahrscheinlich waren widrige Umweltbedingungen die Ursache für die Trennung: Eine Serie schwerer Dürren, die nach jüngsten paläoklimatischen Untersuchungen vor etwa 135 000 bis 90 000 Jahren Ostafrika heimsuchte, vertrieb den Menschen aus seiner Urheimat.

LUCI BETTI-NASH

Dieser bei der südafrikanischen Stadt Hofmeyr gefundene 36 000 Jahre alte Schädel zählt zu den frühesten Fossilien des anatomisch modernen Menschen in Afrika.

Einen Teil der Bevölkerung verschlug es in den Süden des Kontinents, einen anderen in den Westen. Doron Behar vom Rambam Medical Center in Haifa und seine Kollegen datieren die Aufspaltung der beiden Linien anhand genetischer Unterschiede auf etwa 150 000 Jahre vor heute. Erst im Jungpaläolithikum vor 40 000 Jahren vereinigten sich die getrennten Zweige wieder.

Beinahe wäre es nicht mehr dazu gekommen. Die genetischen Daten deuten darauf hin, dass die komplette Menschheit vor etwa 70 000 Jahren weniger als 2000 Individuen zählte. Erst mit dem Aufkommen technischer Errungenschaften wie spezialisierter Werkzeuge aus Feuerstein oder Knochen und unter günstigeren klimatischen Bedingungen breitete sich der Mensch schließlich in ganz Afrika und bald darauf auch auf anderen Kontinenten aus.

The American Journal of Human Genetics, Bd. 82, S. 1130

ASTROPHYSIK

Verschleierte Galaxien

■ Interstellare Staubwolken machen zwar nur einen winzigen Bruchteil der Masse einer Galaxie aus, stellen jedoch ein großes Problem für Astrophysiker dar. Ihre Absorption und Reemission von Strahlung verändert die wellenlängenabhängige Leuchtkraft von Galaxien in unbekannter Weise. Physiker um Richard Tuffs vom Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg haben jetzt ein Modell der Staubverteilung in Galaxien entwickelt, mit dem sie die Verzerrung des Galaxienspektrums durch die Teilchenwolken modellieren können.

Ihr Modell erklärt auch ein lange mysteriöses Phänomen: In manchen Galaxien

C. HOWK & B. SAVAGE, UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON; A. SHARP, NOAO

Bei der Galaxie NGC 891 zeigt sich der Licht schluckende Effekt des interstellaren Staubs besonders deutlich.

schien der Staub wesentlich mehr Infrarotstrahlung abzugeben, als die Sterne Energie produzierten. Tatsächlich absorbiert er jedoch, wie nun die Heidelberger Berechnungen zeigen, viel mehr Licht als vermutet. Die Strahlungsleistung der Sterne wurde also systematisch unterschätzt.

Die Forscher haben ihr Modell an über 10 000 nahe gelegenen Galaxien getestet. Stets zeigte sich, dass die Differenz zwischen der beobachteten und der berechneten Strahlungsleistung genau der vom Staub emittierten Infrarotstrahlung entspricht. Über die jetzt bekannte Leuchtkraftfunktion von Galaxien kann man die spektrale Energieverteilung aller Strahlung im All berechnen. Diese wiederum erlaubt Rückschlüsse auf interessante kosmische Parameter wie Sternentstehungsraten.

The Astrophysical Journal Letters, Bd. 678, L101

Mitarbeit: Lars Fischer

DPA / UPI PHOTO, CARLOS GUTIERREZ

Blitze aus der Asche

Anfang Mai brach nach über 9000 Jahren völlig unerwartet der Vulkan Chaitén in Südchile aus und verdunkelte mit einer 30 Kilometer hohen Aschesäule den Himmel. Als wäre das Schauspiel noch nicht unheimlich genug, tauchten zahllose Blitze die Szene in ein gespenstisches Licht. Elektrische Entladungen am Rand vulkanischer Aschewolken wurden schon öfter beobachtet, aber selten gelang eine so spektakuläre Aufnahme wie diese. Über die Ursache des Phänomens spekulieren Physiker seit Langem. Eine mögliche Erklärung lieferte jüngst der Nachweis, dass die Ascheteilchen – wohl durch Reibung mit der Luft – stark elektrisch geladen sind.

ÖKOLOGIE

Chaos in Planktongemeinschaften

Unter absolut konstanten Bedingungen zeigten die Populationen von Planktonorganismen bei einem achtjährigen Versuch starke Fluktuationen, die wie zufällig aussahen, aber den Gesetzen der Chaostheorie gehorchten.

Von Klaus Jöhnk

Von Wettervorhersagen wissen wir aus leidiger Erfahrung, dass sie nur bedingt zuverlässig sind. Lediglich für wenige Tage im Voraus ist eine einigermaßen zutreffende Prognose möglich. Wie der Mathematiker und Meteorologe Edward Lorenz schon in den 1960er Jahren mit einfachen Modellen nachwies, führen bereits minimale Änderungen in den Anfangsbedingungen oder Variablen im dynamischen System der Atmosphäre zu unerwartet großen Änderungen in den Vorhersagen – was oft als »Schmetterlingseffekt« bezeichnet wird.

Dabei ist das zu Grunde liegende mathematische System völlig deterministisch. Sein Verhalten lässt sich, obwohl es chaotisch und zufällig scheint, im Prinzip berechnen und folgt bestimmten Mustern (wie dem bekannten »Lorenz-Attraktor«). Nur müsste man für eine längerfristige Vorhersage den Ausgangszustand des Systems unendlich genau kennen, was in der Natur nicht möglich ist. Bei echtem Zufall wäre jede Prognose grundsätzlich ausgeschlossen, so dass sich nur Wahrscheinlichkeiten angeben ließen.

Vor drei Jahrzehnten zeigte sich, dass auch in der Ökologie unter bestimmten Bedingungen das Chaos regieren kann. So entdeckte Lord May von der University of Oxford in einfachen Populationsmodellen eine komplexe Dynamik, die chaotische Züge trägt. Daran entzündete sich eine heftige Debatte, ob solche Phänomene auch in natürlichen Populationen auftreten. Mit mathematischen Modellen ließ sich zwar zeigen, dass eine Vielzahl von ökologischen Mechanismen zu chaotischem Verhalten führen kann. Der empirische Nachweis ist allerdings äußerst schwer zu erbringen.

Tatsächlich gibt es bis heute nur wenige sehr einfache Modellsysteme, die mit Chaos assoziiert werden. Nach gängiger Meinung sind Änderungen in komplexen Gemeinschaften durch externe Faktoren wie jahreszeitliche Wetterschwankungen oder andere Störungen bedingt; werden diese ausgeschaltet, sollte sich das System zu einem Gleichgewichtszustand hin bewegen.

Jetzt konnte eine internationale Forschergruppe aus den Niederlanden, Deutschland und den USA, angeführt von Elisa Benincà und Jef Huisman von der Universiteit van Amsterdam, erstmals klare Beweise für chaotische Dynamik in einem Nahrungsnetz erbringen. Grundlage war ein langjähriges Experiment des Biologen Reinhard Heerkloß von der Universität Rostock, der im Labor eine aus der Ostsee isolierte Planktongemeinschaft kultivierte. Dazu füllte er ein Fass mit einer zehn Zentimeter dicken Sedimentschicht und goss 90 Liter filtriertes Wasser mitsamt aller Lebewesen bis zu einer Größe von 0,2 Millimetern aus dem Darß-Zingst-Bodden zwischen Rostock und Stralsund hinein. Mehr als acht Jahre lang hielt er diesen »Mesokosmos« unter konstanten Umweltbedingungen (wie gleich bleibender Beleuchtung und Temperatur) und entnahm zweimal wöchentlich eine Probe, um die Entwicklung der Planktonpopulation zu verfolgen.

REINHARD HEERKLOSS, UNIVERSITÄT ROSTOCK

In diesem Fass kultivierte Reinhard Heerkloß von der Universität Rostock acht Jahre lang eine aus der Ostsee isolierte Planktongemeinschaft und verfolgte die Populationsdynamik der enthaltenen Organismen.

Dabei bestimmte er nicht nur die Anzahl der einzelnen Organismen, sondern maß auch die Konzentration der Nährstoffe Phosphor und Stickstoff. Zur Auswertung fasste er die Populationen der zahlreichen Bakterien sowie Phyto- und Zooplankter in zehn verschiedene Gruppen zusammen. Für jede davon stand nach Abzug der Initialisierungsphase am Ende des Experiments ein Datensatz von 690 Messwerten für die mathematische Analyse zur Verfügung.

Extreme, unvorhersagbare Populationsschwankungen

Nach klassischer Sicht hätte die Häufigkeit der einzelnen Planktongruppen mit der Zeit einen mehr oder weniger konstanten Gleichgewichtszustand erreichen sollen. Stattdessen zeigte das Langzeitexperiment jedoch ungewöhnlich starke Fluktuationen, ja ein geradezu erratisches Verhalten (Grafik rechts unten). Eine Planktongruppe, die für Monate oder sogar Jahre gar nicht oder nur in geringer Anzahl vorkam, konnte auf einmal explodieren; umgekehrt passierte es, dass die Population regelmäßig auftretender Plankter urplötzlich zusammenbrach.

Verlauf und Zeitpunkt der starken Schwankungen ließen sich nur teilweise mit den schon länger bekannten Räuber-Beute-Zyklen erklären. Demnach sollte eine große Menge an Phytoplankton zu einer starken Vermehrung des Zooplanktons führen, da dieses reichlich Nahrung

JOLANDA M. VAN IPEREN, ROYAL NETHERLANDS INSTITUTE FOR SEA RESEARCH

Jeder Tropfen Meerwasser wimmelt von winzigen Planktonorganismen, die miteinander konkurrieren oder in einem Räuber-Beute-Verhältnis zueinander stehen.

findet. Sobald alles Futter weggefressen ist, bricht die Zooplanktonpopulation ein. Da nun kaum noch Räuber da sind, kann sich das Phytoplankton erholen, und der Zyklus beginnt von vorne.

Die außergewöhnlich lange Dauer des Experiments von Heerkloß erlaubte eine detaillierte Untersuchung der Ergebnisse mit modernen Methoden der nichtlinearen Zeitreihenanalyse, an der ich beteiligt war. Dabei gelang es, zwischen stochastischer oder chaotischer Dynamik zu unterscheiden. Zuerst untersuchten wir die Vorhersagbarkeit der Artenhäufigkeit. Dazu diente ein nichtlineares Modell vom Typ eines assoziativen neuronalen Netzwerks (Spektrum der Wissenschaft 11/1992, S. 134). Es ist lernfähig und kann anhand der vergangenen Entwicklung eine Vorhersage der Planktonhäufigkeit in der Zukunft machen. Diese Prognose verglichen wir mit den tatsächlich gemessenen Daten. Dabei zeigte sich, dass die Vorhersagbarkeit kurzfristig sehr gut war, sich aber nach 15 bis 30 Tagen rapide verschlechterte.

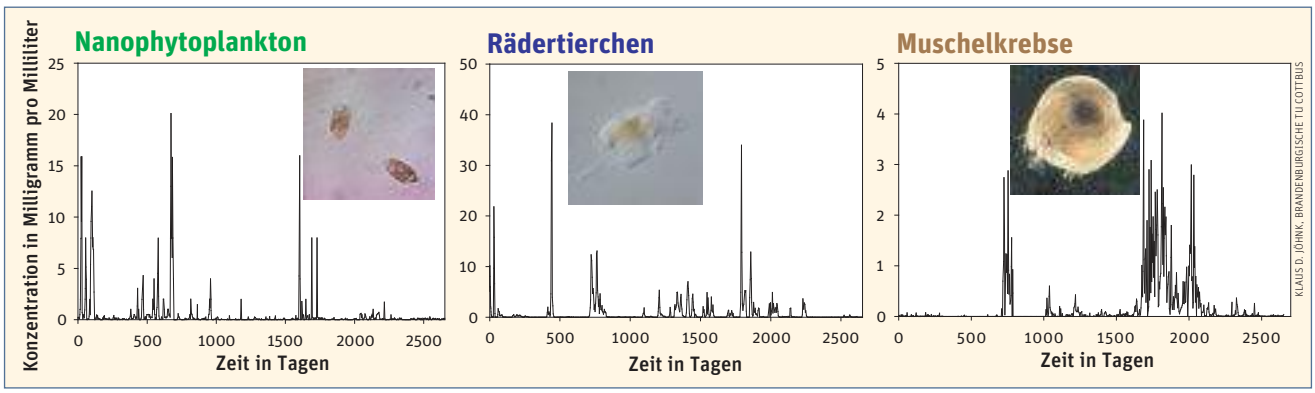
Das stand in Einklang mit chaotischem Verhalten. Allerdings kann auch in linearen, nichtchaotischen Systemen auf Grund von zufälligen Störungen die Vorhersagbarkeit auf längere Sicht abnehmen. Um das zu prüfen, führten wir einen Test mit dem bestmöglichen linearen Vorhersagemodell durch. Dessen Prognosen waren allerdings deutlich schlechter als die des nichtlinearen neuronalen Netzwerks, was für eine starke nichtlineare Komponente im Nahrungsnetz sprach – auch das in Einklang mit chaotischem Verhalten.

Für den endgültigen Beweis berechneten wir den so genannten Ljapunow-Exponenten der einzelnen Zeitreihen. Er gibt an, wie schnell sich die Entwicklungswege (Trajektorien) zweier anfangs nahe beieinanderliegender Zustandsvektoren voneinander entfernen. Ist er negativ, bewegt sich das System auf ein stabiles Gleichgewicht oder einen so genannten Grenzzyklus zu, in dem es zyklisch zwischen verschiedenen Zuständen wechselt. Bei einem positiven Ljapunow-Exponent divergieren die Trajektorien dagegen: Anfangs beieinanderliegende Punkte im Zustandsraum entfernen sich mit der Zeit exponentiell voneinander, was als Beweis für chaotisches Verhalten gelten kann.

Die von uns analysierten Planktongruppen lieferten ein erstaunlich konsistentes Bild: Alle Ljapunow-Exponenten waren nicht nur positiv, sondern hatten fast identische Werte. Als Vorhersagbarkeitshorizont ergab sich ein Zeitraum von etwa 25 Tagen. Indem wir indirekte Methoden zur Bestimmung des Ljapunow-Exponenten anwandten, konnten wir auch mit dieser Methode die Möglichkeit stochastischen Verhaltens ausschließen.

Das erhaltene Bild der Populationsdynamik war also klar und in sich stimmig. Auch ohne den Einfluss äußerer Faktoren, die der Versuchsaufbau ausschaltete, zeigten sich starke Fluktuationen in der Artenhäufigkeit, die auf nichtlinearen internen Wechselwirkungen beruhten. Der Ljapunow-Exponent war durchweg positiv. Die Entwicklung der Planktongemeinschaften ließ sich kurzfristig sehr gut vorhersagen; für Zeiträume von 15 bis 30

Die Häufigkeit der verschiedenen Planktongruppen – hier drei Beispiele – variierte im Lauf der Zeit extrem stark. Die Schwankungen spiegelten, wie eine mathematische Analyse ergab, chaotisches Verhalten wider.



KLAUS D. JÖHNK, BRANDENBURGISCHE TU COTTBUS

Als Abonnent haben Sie viele Vorteile!

1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.
2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.
3. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.
4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.
5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.
6. Unter **www.spektrum-plus.de** finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können, sowie
7. den Spektrum-Mitgliederausweis mit zahlreichen Vergünstigungen.

Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743
per Fax: 06221 9126-751
per E-Mail: service@spektrum.com
oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

Abonnieren oder verschenken

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabo bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.

Buch »Die 7 größten Rätsel der Wissenschaft«
Erfrischend einfach und lebendig erklären David und Arnold Brody die sieben Pfeiler der Naturwissenschaften.

Leser werben Leser

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt? Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!

Technaxx DVB-T-Stick S3.
Der DVB-T-Stick S3 sorgt für hervorragende Bilder und eine hohe Auflösung. Mit EPG-Programmführer, USB-2.0-High-Speed-Verbindung, Kanalvorschau, Videotext und zeitgesteuerter Aufnahme. Lieferumfang: Antenne, Fernbedienung, Treiber und Software

Produkt des Monats

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstr. 3–5 | 69126 Heidelberg | Telefon 06221 9126-600 | Telefax 06221 9126-751 | www.spektrum.de | Geschäftsführer: Markus Bossle, Thomas Bleck | Amtsgericht Mannheim | HRB 338114 | Abonnementsverwaltung: ZENIT Pressevertrieb GmbH | Julius-Hölder-Str. 47 | 70597 Stuttgart | Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Tagen, was bei den betrachteten Organismen etwa 5 bis 15 Generationszyklen entspricht, verschlechterten sich die Prognosen jedoch drastisch. Bestenfalls ließ sich dann noch die Schwankungsbreite angeben. Damit war der erste experimentelle Nachweis von Chaos in einem komplexen Nahrungsnetz gelungen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben weit reichende Konsequenzen. Wie sie zeigen, ist es bei natürlichen Ökosystemen ebenso wie beim Wetter kaum möglich, den Zustand über längere Zeit hinweg zu prognostizieren. Das gilt auch für Vorhersagen der Artenvielfalt. Die Frage ist nun, ob dieses chaotische Verhalten bei anderen Populationen in freier Natur gleichfalls auftritt. Möglicherweise wird es dort durch externe Faktoren so weit überlagert, dass man ihm nur mit noch längeren Untersuchungszeiträumen auf die Spur kommen kann.

Bei Plankton-Organismen mit ihren Generationszeiten von wenigen Tagen ergab sich die Antwort in knapp zehn Jahren – was für ein Forscherleben akzeptabel ist. Bei höheren Tieren oder Pflanzen würden daraus leicht tausend oder mehr Jahre. Ein Nachweis ist damit praktisch ausgeschlossen. Umso größere Bedeutung kommt der Forschung an aquatischen Mikroorganismen zu, die in exemplarischer Weise für dynamisches Verhalten in komplexen Nahrungsnetzen Modell stehen können.

Klaus Jöhnk forscht am Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei in Neuglobsow über die klimagesteuerte Ausbreitung von toxischen Cyanobakterien in Seen und war maßgeblich an den hier beschriebenen mathematischen Analysen beteiligt.

UMWELT Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der Östrogen-Blues

Belastung mit hormonähnlichen Substanzen aus Abwässern verbessert den Gesang von Staren und erhöht ihre Attraktivität für Weibchen. Doch leidet das Immunsystem der Vögel.

Von Lars Fischer

Unter den Substanzen, die durch menschliche Aktivitäten in die Umwelt gelangen, bereiten Wissenschaftlern und Umweltschützern diejenigen besondere Kopfschmerzen, die im Organismus hormonähnliche Effekte auslösen. Dazu gehören Bisphenol A, das als Ausgangsstoff einer wichtigen Klasse von Kunststoffen dient, und in Plastik enthaltene Weichmacher wie Phthalate. Beide werden in großen Mengen industriell verarbeitet und sind in der Natur schwer abbaubar. Als endokrin wirksame Substanzen stören sie – ebenso wie ins Abwasser gelangende Komponenten von Antibabypillen – den Hormonhaushalt vieler wild lebender Tiere und beeinflussen so deren Überleben und Fortpflanzung.

In diesem Zusammenhang haben Wissenschaftler bei Staren *(Sturnus vulgaris)* jetzt einen neuen bedenklichen Effekt nachgewiesen. Dort greifen die Chemikalien in einen entscheidenden Schritt der Populationsentwicklung ein, indem sie den Gesang der Vögel und damit ihre Paarungschancen beeinflussen – allerdings nicht zwangsläufig zu deren Nachteil. Die von den Wissenschaftlern untersuchten Verbindungen erwiesen sich im Experiment nämlich als Hirndoping.

»Das Erstaunliche daran ist, dass die Kontamination mit natürlichen und künstlichen Östrogenen die sexuelle Attraktivität der Männchen erhöht«, erklärt Stefan Leitner vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen, der zusammen mit Forschern der Cardiff University die Auswirkungen der Chemikalien auf Singvögel untersucht hat.

Natürliche und künstliche Substanzen mit hormonähnlicher Wirkung (*endocrine disrupting chemicals*, EDC) kommen unter anderem in Siedlungsabwässern vor. Moderne Kläranlagen leiten diese Wässer durch biologische Filterbetten mit humusreichem Material. Darin bleiben die problematischen Stoffe zurück und reichern sich an. Große wirbellose Tiere wie Würmer, Insekten oder Schnecken in den Filterbetten enthalten deswegen bis zu tausendmal so viel EDC wie die ursprünglichen Abwässer.

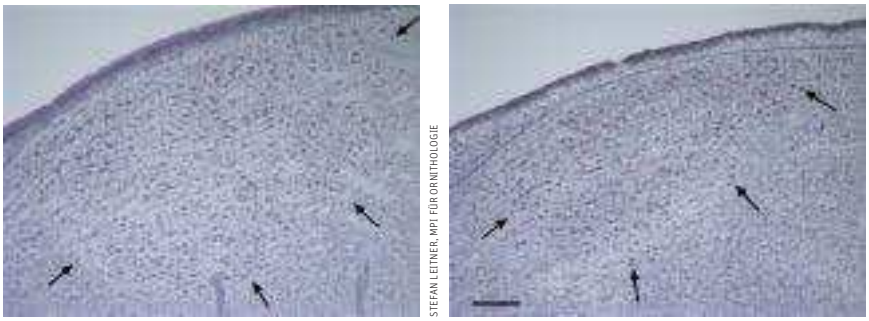
Belastung mit hormonähnlichen Substanzen

Bei etlichen Arten von Singvögeln stehen solche Makroinvertebraten ganz oben auf dem Speisezettel. In Freilandbeobachtungen stellten Leitner und seine Kollegen fest, dass Stare fast die Hälfte ihres Nahrungsbedarfs daraus decken. Die Vögel sind daher beträchtlichen Mengen hormonähnlicher Substanzen ausgesetzt. Dazu zählen auch Östrogene und damit verwandte Verbindungen. Sie sind bei Wirbeltieren an der Reifung der weiblichen Geschlechtsorgane und der Fortpflanzung beteiligt. Bei Singvögeln steuern sie außerdem die Entwicklung des Gesangskontrollzentrums im Vorderhirn (*higher vocal center*, HVC) in männlichen Tieren.

STEFAN LEITNER, MPI FÜR ORNITHOLOGIE

Stare ernähren sich auch von wirbellosen Tieren aus den Filterbetten von Kläranlagen, die hormonähnlich wirkende Substanzen angereichert haben. Solche Stoffe verbessern, wie sich nun zeigte, einerseits den Gesang der Vögel, schwächen andererseits aber ihr Immunsystem.

Dieser Bereich des Gehirns ist ausgesprochen plastisch. Zum Beispiel schwankt seine Größe, gesteuert von Hormonen, bei vielen Singvogelarten im Jahreslauf. Wie aus früheren Untersuchungen bekannt ist, stören Östrogenantagonisten wie DDT und seine Stoffwechselprodukte bei Rotkehlchen die Entwicklung des Gehirns und lassen



STEFAN LEITNER, MPI FÜR ORNITHOLOGIE

Das Gesangskontrollzentrum im Vorderhirn – auf den Gehirnschnitten durch Pfeile markiert – ist bei Staren, deren Nahrung Substanzen mit hormonähnlicher Wirkung enthielt (links), deutlich vergrößert.

den Gesang verarmen. Im Umkehrschluss liegt deshalb die Vermutung nahe, dass die Zufuhr von Östrogenen mit der Nahrung die Virtuosität der Sänger steigern sollte. Aber haben hormonähnliche Verbindungen in ökologisch relevanten Konzentrationen tatsächlich diesen Effekt?

Erhöhte Fortpflanzungschanchen durch besseren Gesang?

Um das zu prüfen, setzten Biologen um Shai Markman und Katherine Buchanan von der Cardiff University männliche Stare einer Mischung aus 17-beta-Östradiol, Bisphenol A und Phthalaten aus. Welche Mengen der hormonähnlichen Substanzen die Vögel unter natürlichen Bedingungen aufnehmen, bestimmten die Wissenschaftler, indem sie zunächst den EDC-Gehalt von wirbellosen Tieren in den Filterbetten biologischer Klärstufen ermittelten. Durch Freilandbeobachtungen fanden sie dann heraus, wie viele solche Tiere ein Star im Schnitt frisst. Die daraus berechnete Tagesdosis wurde den Vögeln verabreicht.

Die Ergebnisse bestätigten die Vermutungen der Forscher. Im Vergleich zu östrogenfrei ernährten Staren vergrößerte sich das Volumen des für den Gesang zuständigen Hirnbereichs bei den Versuchstieren um rund ein Fünftel. Entsprechend steigerten sich Qualität und Quantität des Gesangs. Die Vögel trällerten nicht nur wesentlich mehr, sondern hatten auch ein größeres Gesangsrepertoire: Die Strophen wurden länger, und ihre Anzahl pro Stunde vervierfachte sich.

Das wirkte sich direkt auf die Fortpflanzungschancen der Tiere aus. Die Komplexität des Gesangs ist bei Staren ein zentrales Kriterium der Partnerwahl, und tatsächlich zeigten wild gefangene Weibchen eine deutliche Präferenz für das Zwitschern der östrogengedopten Männchen. Ob das tatsächlich auch einen Vorteil bei der Fortpflanzung bringt, bezweifelt Leitner jedoch: »Wir haben noch nicht prüfen können, wie sich die Belastung tatsächlich auf den Fortpflanzungserfolg auswirkt. Es kann sein, dass sich der Vorteil durch andere Effekte in sein Gegenteil verkehrt und die kontaminierten Vögel insgesamt weniger Nachkommen haben.«

Dafür spricht, dass die Östrogene auch einen weniger positiven Effekt zeigen: Sie schwächen das Immunsystem. Das demonstrierten die Forscher, indem sie das pflanzliche Protein Phytohämagglutinin in die Flügelunterseite der Tiere injizierten. Die Schwellung des Gewebes an der Einstichstelle ist ein Maß für die Stärke der Immunreaktion. Bei den mit Östrogenen behandelten Staren fiel sie deutlich schwächer aus. Weitere Versuche mit Schaf-Erythrozyten bestätigten die immunsuppressive Wirkung.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Gefährlichkeit endokrin wirksamer Chemikalien – beweisen sie doch, dass solche Substanzen bei Konzentrationen, wie sie in der Umwelt auftreten, Verhalten, Anatomie und Immunsystem von Wirbeltieren beeinflussen können. Da sie über die Nahrungskette weitergereicht werden, ist das Problem sicher nicht auf Stare beschränkt. »Natürlich betreffen«, so Leitner, »unsere Ergebnisse letztendlich auch den Menschen.«

Lars Fischer ist Chemiker und freier Redakteur in Hamburg.

HOCHTEMPERATURSUPRALEITUNG 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Nach dem Kupfer die Eisenzeit?

Japanische Forscher haben nach über 20 Jahren einen neuen Typ von keramischen Hochtemperatursupraleitern entdeckt. Anders als die altbekannten Vertreter dieser Stoffklasse beruht er auf Eisen statt Kupfer.

Von Stefan Maier

Als Karl Müller und Johannes Bednorz im Jahr 1986 entdeckten, dass ein bestimmtes Seltenerdcuprat elektrischen Strom bei tiefen Temperaturen widerstandsfrei leitet, war das gleich aus zwei Gründen eine Sensation: Erstens lag die Sprungtemperatur, ab der die Substanz supraleitend wurde, mit 35 Kelvin weit über dem seit den 1970er Jahren geltenden Rekord von 23 Kelvin; zweitens handelte es sich um eine Keramik, während alle bis dahin bekannten Supraleiter Metalle oder Legierungen waren. Schon ein Jahr später wurde die Entdeckung deshalb mit dem Nobelpreis gewürdigt.

Schnell stürzten sich Forschergruppen in aller Welt auf das neue, viel versprechende Material. Vor allem suchten sie die Sprungtemperatur weiter zu erhöhen. Das gelang mittels chemischer Dotierung, dem kontrollierten Einbringen von Atomen an bestimmten Stellen in der Elementarzelle des Kristalls: ein bisschen Thallium hier, ein bisschen Queck-

silber dort. Zwar mutet das Verfahren ein wenig wie moderne Alchemie an, doch war es sehr erfolgreich. Schließlich hatte die Sprungtemperatur 138 Kelvin erreicht – ein Wert, den noch ein Jahrzehnt zuvor niemand in seinen kühnsten Träumen für möglich gehalten hätte.

Mit den praktischen Fortschritten konnten die theoretischen allerdings nicht mithalten. Schon früh war klar, dass sich die Supraleitung in den keramischen Materialien nicht mit der gängigen Theorie aus den 1950er Jahren erklären ließe. Seither werden diverse Alternativen diskutiert. Aber noch immer ist keine davon allgemein anerkannt. Keine davon kann auch erklären, wieso ausgerechnet Seltenerd-Kupferoxid-Keramiken Hochtemperatursupraleitung zeigen. Welche Besonderheit ist es, die ihnen diese Fähigkeit verleiht? Liegt es am Kupfer oder allgemein an der chemischen Zusammensetzung? Oder ist die Kristallstruktur, in der ebene Kupfer-Sauerstoff-Schichten als Leitungsbahnen der Elektronen dienen, für den Effekt verantwortlich?

Mehr als 20 Jahre lang blieben diese Fragen trotz intensiver Forschung offen. Doch nun ist die Chance auf Antworten deutlich gestiegen; denn überraschend haben Hideo Hosono und seine Kollegen am Tokyo Institute of Technology einen neuen keramischen Supraleiter mit völlig anderer Zusammensetzung entdeckt *(»Journal of the American Chemical Society«, Bd. 130, S. 3296)*. Als Übergangsmetall enthält er Eisen statt Kupfer. Zwar ist seine Sprungtemperatur mit etwa 26 Kelvin im Vergleich zu derjenigen der bekannten Cuprate nicht berauschend, doch das kann die Begeisterung, welche die Entdeckung allenthalben ausgelöst hat, nicht trüben. Schon allein das Auffinden eines neuen Typs von Hochtemperatursupraleiter nach so langer Zeit elektrisiert die Festkörperphysiker.

Hosonos Gruppe hatte zufällig festgestellt, dass bestimmte Verbindungen von Eisen- oder Nickel mit Arsen und Seltenerdoxiden bei sehr tiefen Temperaturen – unterhalb fünf Kelvin – jeglichen elektrischen Widerstand verlieren. Eine davon enthielt, wie die Röntgenbeugung an pulverisierten Proben ergab, wechselnde Schichten aus Eisenarsenid und Lanthanoxid (Bild unten). Das erinnerte sehr an den Aufbau des Cuprats von Müller und Bednorz mit seinen alternierenden Lagen von Kupfer- und Lanthanoxid-Schichten. Damals hatte sich durch Dotieren die Sprungtemperatur drastisch anheben lassen.

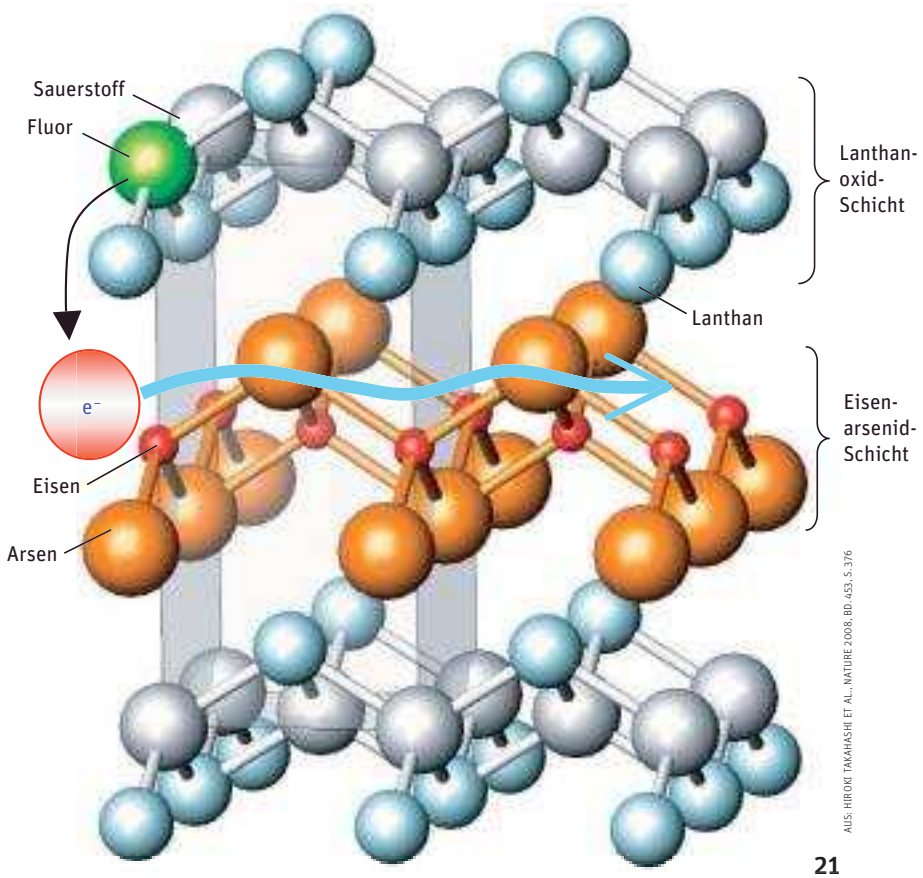
Frischer Wind bei Supraleitern

Hosonos Team versuchte deshalb denselben Trick und ersetzte einen kleinen Teil der Sauerstoff- durch Fluoratome. Tatsächlich stieg daraufhin die Sprungtemperatur auf mehr als den fünffachen Wert: 26 Kelvin. Als optimal erwies sich ein Fluorgehalt von elf Atomprozent.

Für die Theoretiker ist die Existenz eines zweiten Typs von keramischen Hochtemperatursupraleitern ein Geschenk des Himmels. Der Vergleich mit den Cupraten verspricht wertvolle Hinweise auf den Mechanismus des widerstandslosen Elektronenflusses. So bestehen etliche Gemeinsamkeiten wie die schon erwähnte Schichtstruktur sowie die Beteiligung eines Übergangs- und eines Seltenerdmetalls. In beiden Fällen steigert eine Dotierung, die zu einem kompakteren Kristallgitter und einer gemischten Valenz (Wertigkeit) des Übergangsmetalls führt – die formale Oxidationsstufe des Eisens liegt zwischen eins und zwei und die des Kupfers zwischen drei und vier –, die Sprungtemperatur. Zudem sind beide Verbindungstypen in der Wärme nur schlechte elektrische Leiter.

Allerdings gibt es auch Unterschiede. So ist die supraleitende Kupferoxidschicht in den Cupraten flach, weil sich die Sauerstoff- quadratisch um die Kupferatome anordnen. Bei dem neuen Substanztyp sind die Eisenionen dagegen tetraedrisch von Arsenatomen umgeben, so dass sich eine gewellte Schicht ergibt. Elementares Eisen ist ferromagnetisch, Kupfer hingegen nicht. Alle diese Feinheiten gilt es nun bei der Suche nach einer einheitlichen Theorie der Hochtemperatursupraleitung zu berücksichtigen.

Sicher ist, dass die Leitungselektronen Paare bilden müssen, um ohne Kollision mit den Atomen durch das Gitter gleiten zu können. Bei herkömmlichen Tieftemperatursupraleitern sorgt eine Kopplung mit Gitterschwingungen für die Paarung. Die zunehmende thermische Bewegung beim Erwärmen stört diese Kopplung jedoch. Deshalb ist die Mehrzahl der Forscher davon überzeugt, dass bei den Hochtemperatursupraleitern kompliziertere Wechselwirkungsprozesse, etwa zwischen den Spins der Elektronen, eine Rol-



AUS: HIROKI TAKAHASHI ET AL., NATURE 2008, BD. 453, S. 376

Im neuen keramischen Hochtemperatursupraleiter wechseln sich Schichten aus Lanthanoxid und Eisenarsenid ab. Rund elf Prozent der Sauerstoffatome sind durch Fluor ersetzt. Dieses besitzt ein zusätzliches Elektron, das in die Eisenarsenid-Schicht übergeht und dort für die Supraleitung sorgt.

le spielen. Die Eisenarsenide bieten die Gelegenheit zum Testen solcher Theorien an einem völlig anderen Material.

Doch nicht nur den Theoretikern eröffnet der neue Substanztyp glänzende Aussichten. Auch all jene, die auf der Jagd nach einem Supraleiter bei Raumtemperatur sind, wittern nun wieder Morgenluft. Vielleicht wiederholt sich ja die Geschichte von 1986, und die Sprungtemperatur lässt sich mit trickreichen Modifikationen und Verfeinerungen binnen Kurzem erheblich steigern.

Erste Anzeichen dafür gibt es. So berichtete Hosonos Team schon kurz nach seiner Originalveröffentlichung, dass sich die Sprungtemperatur seines Eisenarsenid-Supraleiters unter einem Druck von vier Gigapascal (40 000-fachem Atmosphärendruck) auf 43 Kelvin erhöht. Gleichzeitig meldete eine Gruppe um Zhong-Xian Zhao vom Physikinstitut der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking gar einen Wert von 53,5 Kelvin für ein Material, in dem das Lanthan durch Gadolinium ersetzt ist. Wie weit sich die Sprungtemperatur noch nach oben treiben lässt, ist offen. Doch nachdem es um die Cuprate in letzter Zeit still geworden war, hat die Entdeckung des Eisenarsenid-Supraleiters dem Gebiet neues Leben eingehaucht.

Im Hinblick auf praktische Anwendungen scheint das eisenhaltige Material Vorteile zu haben. Zwar ist es als Keramik ebenso wie die Kupferoxide spröde, aber deutlich härter und bruchfester. Hinzu kommt seine ziemlich einfache Synthese. Die japanischen Forscher erhitzten ein pulverförmiges Gemisch aus Arseniden und Oxiden von Eisen und Lanthan in einer mit Argon gefüllten Glasröhre 40 Stunden lang auf 1250 Grad Celsius. Zur Dotierung setzten sie kleine Mengen von Lanthanfluorid zu.

In Sachen Hochtemperatursupraleiter darf also wieder gehofft werden – auf eine endgültige Klärung des Mechanismus und auf ein Material, das die enormen Vorteile des verlustfreien Stromtransports schon bei Temperaturen bietet, die keine aufwändige und teure Kühlung erfordern. Nicht zuletzt scheint es plötzlich wahrscheinlich, dass sich unter den Übergangsmetallverbindungen mit Schichtstruktur noch etliche weitere Supraleiter verbergen, die der Entdeckung harren.

Stefan Maier ist Professor für Physik am Imperial College in London.

TUMORTHERAPIE 🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Nanogel gegen Krebs

US-Pharmazeuten haben eine winzige Kapsel für Antitumorwirkstoffe entwickelt, die auch von resistenten Krebszellen aufgenommen wird und in deren Innern nur genau eine tödliche Dosis Zytostatikum freisetzt. Danach kann sie weitere Tumorzellen abtöten.

Von Brigitte Osterath

Gängige Chemotherapeutika bekämpfen Krebszellen, indem sie in deren Teilung eingreifen. Das hat den Nachteil, dass sie auch für bestimmte Arten gesunder Körperzellen giftig sind und so beträchtliche Nebenwirkungen verursachen. Außerdem verfügen resistente Krebszellen über Mechanismen, um einer für sie tödlichen Substanz den Zutritt zu verwehren. Ideal wäre es deshalb, den Wirkstoff in eine Hülle zu stecken, die gesunde Zellen vor dem toxischen Medikament schützt, aber für Krebszellen attraktiv ist, so dass auch resistente Vertreter das Paket samt giftigem Inhalt aufnehmen und öffnen.

An solchen Trojanischen Pferden arbeiten Pharmazeuten schon länger. Als Verpackung eignen sich beispielsweise nanometergroße Polymere, die Wirkstoffe in ihrem Innern transportieren, nach außen hin aber von einer unauffälligen Hülle umgeben sind. Einige solche Nanopartikel haben es schon bis in klinische Studien geschafft.

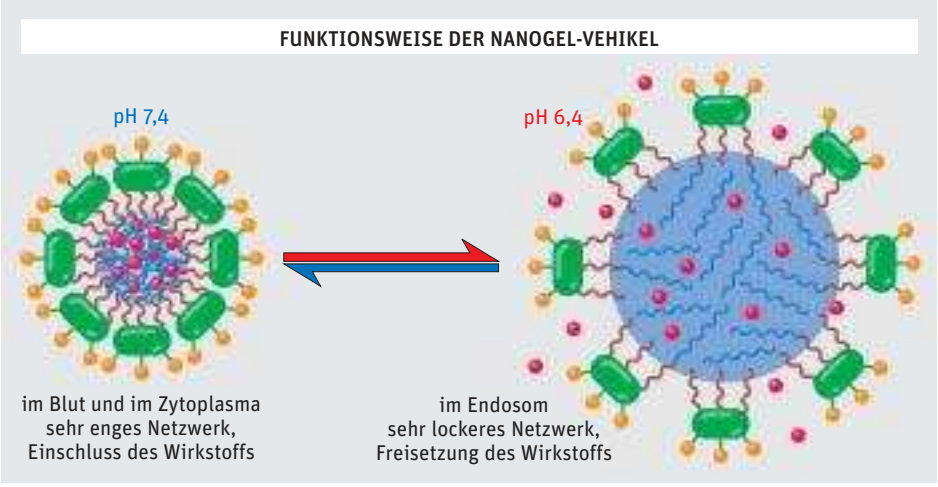
Als Eintrittskarte in Krebszellen kann man beispielsweise Folsäure auf der Oberfläche derartiger Minikapseln anbringen. Dieses Vitamin wird für die Synthese neuer DNA im Verlauf der Zellteilung gebraucht. Wuchernde Krebszellen, die sich besonders oft teilen, haben einen erhöhten Bedarf daran. Deshalb tragen sie bei bestimmten Tumorarten – so den meisten Formen von Eierstockkrebs – besonders viele Folatrezeptoren auf ihrer Membran. Auf diesem Weg können sich mit Folsäure bestückte Nanopartikel Zugang zu resistenten Krebszellen verschaffen.

Aber wie wird der Wirkstoff anschließend freigesetzt? Eine Forschergruppe um You Han Bae an der University of Utah in Salt Lake City hat jetzt einen raffinierten Trick dafür entwickelt *(»Angewandte Chemie«, Bd. 120, S. 2452)*. Er bietet den zusätzlichen Vorteil, dass jeweils nur so viel Chemotherapeutikum abgegeben wird, wie nötig ist, um die Krebszelle zu töten. Nach deren Absterben kann somit kein überschüssiges Gift in die Umgebung oder den Blutkreislauf gelangen und gesunde Zellen schädigen. Die Nanopartikel selbst entweichen unversehrt vom Tatort. Sie können dann in benachbarte Tumorzellen eindringen, um ihr Zerstörungswerk fortzusetzen – so lange, bis ihr Vorrat an Giftstoff aufgebraucht ist.

Raffiniertes Trojanisches Pferd

Die Partikel der US-Forscher enthalten einen Wasser abweisenden Kern, in dem das Antitumormittel Doxorubicin untergebracht ist. Er wird von einem so genannten Block-Copolymer aus Histidin und Phenylalanin gebildet. Das Verhältnis zwischen den beiden Aminosäuren bestimmt den so genannten Säureexponenten (pK_s-Wert), der angibt, wie viele Säuregruppen an den Seitenketten des Polymers unter physiologischen Bedingungen ein Proton angelagert haben. Den Kern umschließt eine hydrophile Hülle aus Polyethylenglykol und dem Protein Rinderserumalbumin. An sie ist die Folsäure gekoppelt.

Auf Grund ihres Aufbaus reagieren diese Nanopartikel empfindlich auf den



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

Die neu entwickelten Nanopartikel tragen als Köder für Krebszellen Folatgruppen auf der Oberfläche. In saurer Umgebung schwellen sie an, so dass ihre Hülle undicht wird und das enthaltene Zellgift austritt.

pH-Wert (Säuregrad) ihrer Umgebung. Beträgt dieser 7,4 – wie im Blut oder innerhalb des Zellplasmas –, so haben sie einen Durchmesser von nur 55 Nanometern. Bei einem pH-Wert von 6,4 oder niedriger – also unter sauren Bedingungen – werden die Histidinreste im Innern des hydrophoben Kerns jedoch protoniert und damit positiv geladen. Als Folge davon stoßen sie sich gegenseitig ab, weshalb das Nanogel stark aufquillt. Die Partikel erreichen so einen Durchmesser von 355 Nanometern und damit ungefähr das 270-Fache ihres ursprünglichen Volumens.

Das hat eine entscheidende Konsequenz: Während in der kompakten Form das Doxorubicin fest eingeschlossen ist, wird die Hülle undicht, wenn sie sich beim Schwellen der Teilchen dehnt, und der gespeicherte Wirkstoff kann entweichen. Der Vorgang ist reversibel. Steigt der pH-Wert, ziehen sich die Partikel wieder zusammen.

Auf der pH-abhängigen Größenänderung der Nanoteilchen beruht ihre

ANZEIGE

Konzentrierter.
Belastbarer.
Ausgeglichener.

Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.
Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – jetzt NEU auch mit **Tebonin® konzent 240 mg.**

Tebonin®
Mehr Energie für das Gehirn.
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.**
Stand: Januar 2008 T/01/08/1

Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt EGb 761®
- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

NEU

SCHWABE
Mit der Natur.
Für die Menschen.
Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel
www.tebonin.de

Funktionsweise. Hat sich eines von ihnen an den Folatrezeptor einer Zelle gebunden, stülpt diese ihre Membran zu einem Bläschen ein, das den Rezeptor plus Partikel enthält, und schnürt es ab. Das resultierende Endosom wandert ins Innere der Zelle. Dabei werden durch spezielle Pumpen Protonen eingeschleust, die den pH-Wert in dem Bläschen auf bis zu 6 erniedrigen.

Infolgedessen quillt das Nanoteilchen auf und gibt seinen Wirkstoff ab. Schließlich sprengt es auf Grund seiner enormen Größe das Endosom und gelangt mit dem freigesetzten Medikament ins Zellplasma. Hier zieht es sich wegen des höheren pH-Werts wieder zusammen und setzt keinen Wirkstoff mehr frei.

Eine Krebszelle nimmt nun so lange Nanopartikel auf, bis genau die für sie tödliche Menge an Doxorubicin in ihr freigesetzt wurde. Dann stirbt sie ab und löst sich auf. Damit kommen auch die Nanopartikel wieder frei und können von benachbarten Tumorzellen aufgenommen werden und diese ebenfalls zerstören. Dem Forscherteam gelang es, zwei solcher Zyklen mit denselben Teilchen durchzuführen. Erst danach war die Menge an mitgeführtem Wirkstoff erschöpft.

Natürlich nehmen auch gesunde Körperzellen vereinzelt Nanopartikel auf und können so manchmal ebenfalls eine tödliche Giftdosis abbekommen. Weil sie nur wenige Folatrezeptoren auf der Oberfläche tragen, geschieht das jedoch vergleichsweise selten. Die Verpackung des Zytostatikums lohnt sich vor allem bei resistenten Krebszellen; denn in sie könnte das nackte Medikament gar nicht eindringen, so dass es ausschließlich gesunde Körperzellen angreifen würde.

Bisher haben die Forscher die Wirksamkeit der Nanopartikel nur an Zellkulturen nachgewiesen. Nun müssen Tests in lebenden Organismen folgen. Erst dann lassen sich auch Fragen wie die nach dem Abbau der Teilchen im Körper oder der Art ihrer Verabreichung klären. Falls auch die In-vivo-Tests erfolgreich sind, wäre das nicht nur ein großer Fortschritt bei der Krebsbekämpfung – dann könnten die Nanopartikel auch als Trojanische Pferde für andere Wirkstoffe und zur Behandlung anderer Krankheiten interessant sein.

Brigitte Osterath promoviert im Fach Chemie am Forschungszentrum Jülich.

Springers Einwürfe

Wie natürlich ist der Logarithmus?

Amazonas-Eingeborene haben angeborenen Zahlensinn bewahrt.

Über dem Eingang zur modernen Wissenschaft prangt Galileis Satz: »Das Buch der Natur ist mit mathematischen Symbolen geschrieben.« Wir haben gelernt, Entfernungen und Zeitabstände in Diagramme einzutragen, von Raumzeitkurven Differenziale und Integrale zu bilden. Mein Physikstudium war die ausgiebige Bestätigung für Galileis monumentalen Satz.

Doch gelegentlich kam es mir wie ein Wunder vor, dass die Mathematisierung der Naturprozesse überhaupt funktionieren konnte. Was hatten die Zahlen in meinem Kopf, bei denen ich mich nicht selten verrechnete, mit Vorgängen in der Außenwelt zu schaffen? Wieso ist die Natur so mathematisch oder die Mathematik so natürlich? Dieses philosophische Rätsel wird derzeit – wie so manch anderes Jahrhundertproblem – Gegenstand der Hirnforschung.

Grundvoraussetzung für das Beziffern räumlicher Verhältnisse ist eine Gabe unseres Gehirns, die der französische Neurowissenschaftler Stanislas Dehaene den Zahlensinn nennt: eine intuitiv hergestellte Beziehung zwischen Zahl und Raum. Schon dreijährige Kinder ordnen vorgesprochene Zahlen auf einer Geraden nach der Größe – kleinere Zahlen links, größere rechts. Wie man durch bildgebende Verfahren weiß, sitzt der Zahlensinn in einer bestimmten Hirnregion, die auf das Kodieren räumlicher Parameter wie Größe, Ort und Blickrichtung spezialisiert ist.

In psychologischen Experimenten erwies sich dieser Zusammenhang zwischen Zahl und Raum als linear: Erwachsene ordnen Zahlen zwischen 1 und 100 auf einer endlichen Zahlenstrecke stets proportional zu deren Größe an, also 25 am Ende des ersten Viertels, 50 in der Mitte und so fort. Verallgemeinert ergibt das die vertraute Zahlengerade, auf der die natürlichen Zahlen von Null bis unendlich von links nach rechts in immer gleichem Abstand aufeinanderfolgen.

Dehaene wollte nachprüfen, ob diese Linearität angeboren oder kulturell erworben ist. Zu diesem Zweck erforschte er den Zahlensinn einer isoliert am Amazonas lebenden Eingeborenengruppe. Die Mundurucu kennen nur Worte für die Zahlen 1 bis 5; bei mehr Objekten sprechen sie pauschal von »einigen« oder »vielen«. Mit ihren kleinen Zahlen addieren und subtrahieren sie zuverlässig, können aber auch große Mengen mit bis zu 80 Objekten gut nach Größen ordnen – zwar nur angenähert, aber auch nicht schlechter als europäische Kontrollprobanden.

Dehaene bat die Mundurucu nun, die Größe unterschiedlicher Punktmengen – zwischen 1 und 10, in einem anderen Versuch zwischen 10 und 100 – auf einem Geradenstück anzuzeigen. Seine Probanden machten das geschickt, aber mit überraschendem Ergebnis. Sie ordneten die Zahlen nicht linear, sondern logarithmisch an *(»Science«, Bd. 320, S. 1217)*. Bei Zahlen zwischen 1 und 10 setzten die Mundurucu also beispielsweise die 5 nicht in die Mitte der Strecke, sondern wie auf einer logarithmischen Skala mehr dem Ende zu. Auch die 50 landete nicht halbwegs zwischen 1 und 100, sondern stets näher bei 100. Da europäische Kindergartenkinder große Zahlen auf die gleiche Weise »stauchen«, zieht Dehaene den Schluss: Unser angeborener Zahlensinn funktioniert logarithmisch – wie unser Gehör, das Lautstärken nach logarithmischen Dezibel wahrnimmt – und wird erst durch kulturelle Einflüsse zur linearen Zahlengeraden gestreckt (siehe auch »Physikalische Unterhaltungen« auf S. 36).

Michael Springer

Eigentlich schade, denke ich nun, dass ich meinen angeborenen Zahlensinn durch den Schuldrill eingebüßt habe. Vielleicht hätte ich im physikalischen Praktikum, statt damals umständlich mit Logarithmentafeln zu hantieren, das meiste im Kopf rechnen können.

Per Software zu den Sternen

Mit dem digitalen Riesenteleskop LOFAR spähen Radioastronomen bald in die Tiefen des Weltalls. Quer über Europa verteilt liefern unscheinbare Antennenfelder demnächst einzigartige Bilder vom jungen Kosmos, und auch die Jagd nach Radioausbrüchen von Schwarzen Löchern und Supernovae ist eröffnet.

Von Heino Falcke und Rainer Beck

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

In Kürze

- Das Teleskop LOFAR wird die Radioastronomie revolutionieren. Extrem einfach gebaute Antennen, die bald über ganz Europa verteilt sind, könnten sogar die **Epoche der Reionisation** aufspüren. Damals, einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall, schickten die ersten Sterne ihr Licht durch das bis dahin dunkle Weltall.
- Der Schlüsselbegriff der neuen Technik ist das *phased array*. Dabei werden die **Daten von vernetzten Antennenfeldern**, die den gesamten Radiohimmel vermessen, digital gespeichert. Fokussiert wird anschließend per Software. So lassen sich selbst nach der eigentlichen Messung beliebige Himmelspunkte ansteuern und auch ultrakurze Radioblitze orten.
- Machbarkeitsstudien ergaben, dass ein Teleskop vom LOFAR-Typ ideal geeignet ist, um von Rovern **auf dem Mond** installiert zu werden.

Schon als junge Doktoranden durften wir dem Giganten in Effelsberg Befehle erteilen. Aus der Beobachtungskanzel des bei Bonn gelegenen 100-Meter-Radioteleskops heraus hatten wir zudem einen prächtigen Blick auf dessen große weiße Schüssel. Waren andere Riesenteleskope bereits in sich zusammengebrochen – wie das 91-Meter-Green-Bank-Instrument in West Virginia im Jahr 1988 –, verrichtete dieses Meisterstück deutscher Wertarbeit nach 25 Jahren noch immer klaglos seinen Dienst. Kaum waren Himmelskoordinaten in den Computer eingetippt, bewegte sich der 3200 Tonnen schwere Koloss scheinbar mühelos in eine neue Richtung. Sechs Minuten brauchte er für eine Drehung um 180 Grad, um dann zum Beispiel eine der wenigen hellen Radioquellen am Himmel zu fokussieren, anhand derer wir unsere Messungen kalibrierten. Das waren zwar sechs Minuten, während derer man nicht messen konnte. Aber für jeden, der einst staunend vor großen Baggern, Kränen und Lokomotiven stand, wurden Kindheitsträume wahr – und wir wurden dafür auch noch mit dem Doktortitel belohnt.

Die Effelsberger Riesenschüssel ist inzwischen 36 Jahre alt, dank ständiger Verbesserungen aber weiterhin stark gefragt. Doch eines Tages werden Erfahrungen wie die unseren leider der Vergangenheit angehören. Heute bauen wir mit unseren Kollegen ein Riesenradioteleskop der nächsten Generation: LOFAR, das sich von den Niederlanden aus bald über ganz Europa erstreckende *Low-Frequency Array*. Binnen einer Sekunde wird es zu jedem beliebigen Ort am Himmel »schalten« können. Es wird so gar in mehrere Richtungen gleichzeitig schauen, ohne dass es sich dafür sichtbar bewegen müsste. Aus einiger Entfernung gesehen wird man das Teleskop nicht einmal als solches erkennen. Und dennoch wird es mit bislang undenkbarer Empfindlichkeit und Flexibilität in völlig neue Tiefen des Universums vorstoßen.

Das klingt vielleicht paradox, ist aber nur eine weitere Konsequenz der digitalen Revolution. Denn auch Radioteleskope werden virtuell – zumindest ihre wichtigsten Bestandteile. LOFAR ist mehr ein Softwareteleskop denn ein mechanisches Wunderwerk. Und es steht für einen weiteren Trend. Während die moderne Technik auf immer höhere Frequenzen zielt, ist die Niederfrequenzastronomie im Bereich zwischen 10 und 300 Megahertz (Millionen Hertz, MHz), entsprechend Wellenlängen zwischen 30 und einem Meter, heute ebenfalls wieder in den Fokus gerückt.

Als die ersten Sterne leuchteten

1931 schlug die Geburtsstunde der Radioastronomie, als der Amerikaner Karl Jansky entdeckte, dass die Milchstraße Radiostrahlung im Meterwellenbereich um 20 MHz aussendet. Später, in den 1960er Jahren, wurden mit Hilfe von Radiowellen energiereiche kosmische Leuchtfeuer wie Pulsare und Quasare ebenfalls bei niedrigen Frequenzen entdeckt. Allmählich aber verlor der Niederfrequenzbereich an Beachtung. Heute weiß man jedoch, dass die Expansion des Universums die Emissionen uralter kosmischer Wasserstoff-Strahlungsquellen so stark »gestreckt« oder rotverschoben hat, dass sie jetzt im Niederfrequenten liegen. Hier steht also ein Fenster offen, das uns weit zurück in die Ursprungsphase des Kosmos schauen und vielleicht auch völlig neue Phänomene entdecken lässt.

Diese Möglichkeiten hatten Astronomen im Hinterkopf, als sie LOFAR planten. Ein niederländisches Konsortium aus Universitäten

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

MPI FÜR RADIOASTRONOMIE, WOLFGANG REICH

Das LOFAR-Teleskop erstreckt sich bald über ganz Europa. In den Niederlanden sind 36 Stationen geplant, hinzu kommen Antennenfelder in Effelsberg, Garching, Jülich, Potsdam und Tautenburg, in Onsala (Schweden), Edinburgh* (Schottland), Jodrell Bank*, Lords Bridge* und Chilbolton (England), in Nançay (Frankreich), Medicina (Italien), Toruń*, Zielona Gora* und Krakau* (Polen) sowie in Rakhiv* (Ukraine, gemeinsam mit Österreich). An den mit * markierten Standorten stehen noch finanzielle Zusagen aus. Das kleine Bild zeigt die erste deutsche LOFAR-Station (Pfeil). Im Hintergrund: das Effelsberger 100-Meter-Radioteleskop.

und Forschungsinstituten, gemeinsam mit einigen wenigen deutschen Kollegen und angeführt vom astronomischen Forschungsinstitut ASTRON, definierte zunächst vier Schlüsselprojekte. Das erste zielt auf das kosmische Zeitalter der Reionisation, die Initialzündung des kosmischen Leuchtens. In jener Epoche, einige hundert Millionen Jahre nach dem Urknall, wurden die ersten Sterne geboren und ionisierten den Wasserstoff im All. Zur Untersuchung der Reionisation benötigt man eine große Antennenkonzentration auf einem Gebiet von rund vier Quadratkilometer Fläche. Diese Konfiguration liefert eine Auflösung von rund 3,5 Bogenminuten (die Winkelauflösung berechnet sich aus der beobachteten Wellenlänge geteilt durch den maximalen Abstand der Antennen). Das genügt, denn der wichtigste Beitrag des schwachen Signals, das von den Ursprüngen des leuchtenden Universums kündet, sollte Simulationen zufolge (siehe SdW 11/2005, S. 12) auf Winkelskalen von einigen Bogenminuten zu entdecken sein.

Das zweite Schlüsselprojekt ist eine Radiodurchmusterung des Nordhimmels, die in einen Katalog von Radioquellen bei verschiedenen Frequenzen münden soll. Mit hundert Millionen Einträgen wird er alle seine Vorgänger zusammengenommen um mehr als einen Faktor zehn übertreffen. Das erfordert aber nicht nur viele Antennen, um die nötige Empfindlichkeit zu erreichen, sondern auch eine Winkelauflösung im Bereich einiger Bogensekunden, damit sich die vielen Quellen nicht überlagern. Daher müssen die Abstände zwischen einigen der Antennen hundert und mehr Kilometer betragen.

Im dritten und vierten Schlüsselprojekt wollen LOFAR-Forscher die Flexibilität eines Softwareteleskops ausnutzen und transiente Signale jagen: Radioquellen, die unerwartet und nur für kurze Zeit am Himmel erscheinen. Dazu gehören Radioausbrüche von Schwarzen Löchern und Supernovae, aber auch Radioblitze von nahen Sternen und von extraterrestrischen Planeten. So kommen wir auch kosmischen Teilchen auf die Spur, indem wir die von ihnen beim Auftreffen auf die Atmosphäre ausgelösten Radioblitze registrieren. Mit LOFAR ist es im Prinzip aber auch mög-

ASTRON, NIEDERLANDE

Eine Antennenkachel wird installiert. Sie soll Frequenzen zwischen 110 und 270 MHz abdecken. Für den Frequenzbereich von 10 bis 80 MHz sind hingegen einfache Drahtantennen zuständig: Ein senkrechter Stab dient der Stabilisierung, während die vier Drähte, von denen er gehalten wird, die Funktion zweier Dipole übernehmen (kleines Bild vorige Seite).

lich, die Ankunft solcher Teilchen auf dem Mond zu detektieren. Neutrinos etwa können in dessen Untergrund Radiostrahlung erzeugen, die sich auf der Erde messen lässt. Massereichere kosmische Elementarteilchen lösen beim Auftreffen auf dem Mond einen Teilchenschauer aus, der seinerseits niederfrequente Tscherenkow-Strahlung produziert.

Diese Strahlung tritt auf, wenn sich geladene Teilchen schneller durch Materie bewegen als Licht (das nur im Vakuum tatsächlich »Lichtgeschwindigkeit« besitzt und in allen anderen Medien langsamer ist). Je flacher nun der Winkel, unter dem das Teilchen auf den Mond trifft, desto größer ist die Chance, dass die entstehende Strahlung dessen Oberfläche wieder verlässt und von einem Teleskop registriert werden kann.

Voraussetzung ist allerdings der seltene Fall, dass die ursprüngliche Energie der kosmischen Partikel mindestens einige 10^{21} Elektronenvolt (eV) beträgt. Daher benötigt man eigentlich einen gewaltigen Detektor: Nutzte man den gesamten Mond als Detektorfläche, wäre das gerade groß genug. Mit einem bisschen Glück werden wir solche Ereignisse aber auch mit LOFAR messen können.

Beteiligt an all diesen Projekten sind heute auch viele deutsche astronomische Institute in Bochum, Bonn, Hamburg und Bremen sowie das Max-Planck-Institut (MPI) für Astrophysik, das MPI für Radioastronomie (MPIfR), das Astrophysikalische Institut Potsdam (AIP) und die Thüringische Landessternwarte in Tautenburg. Im vergangenen Jahr initiierten deutsche Wissenschaftler zwei weitere Schlüsselprojekte. Unter Leitung des Bonner MPIfR sollen erstmals magnetische Felder im intergalaktischen Raum mit Hilfe von Radiowellen nachgewiesen und ihr Ursprung ergründet werden. Das AIP hingegen will Radioausbrüche der Sonne sehr viel genauer vermessen als bisher möglich. Pro Bild der Sonne im Radiolicht werden dabei inklusive »Schwenken« nur wenige Sekunden benötigt, so dass sich jede Eruption genau verfolgen lässt.

Alle diese Projekte erfordern sehr hohe Rechenleistung und Datenübertragungsraten. Darum wird im digitalen Herzen des Teleskops, dem LOFAR-Rechenzentrum im niederländischen Groningen, gerade ein neuer Supercomputer installiert. Der Blue Gene/P, derzeit leistungsfähigstes Produkt des Computerkonzerns IBM, soll die Daten aller Antennen miteinander korrelieren und sie zu Bildern verarbeiten. Schon sein Vorgänger stand im LOFAR-Rechenzentrum und war mit 27 Teraflops (Billionen Gleitkommaoperationen pro Sekunde) zeitweise sogar Europas schnellster Computer.

Doch mit der Auswertung der Daten Tausender Einzelantennen wären beide Rechner überfordert. Daher fasst man die Antennen in lokale Felder (»Stationen«) mit je 48 Antennen zusammen. *Digital beamforming* (Kasten rechts) reduziert deren Daten auf den Datenstrom einer einzigen virtuellen Antenne, und nur dieser wird an den Superrechner weitergereicht.

Für den Frequenzbereich von 10 bis 80 MHz sind einfache Drahtantennen in Form einer Pyramide zuständig. Für kosmische Signale im UKW-Bereich von 87 bis 108 MHz ist in Europa kein Durchkommen möglich. Bei Frequenzen zwischen 110 bis 270 MHz arbeiten wir mit Antennenelementen aus je 16 gekreuzten Dipolen (»Kacheln«). Jede Kachel besitzt einen eigenen, analogen Beamformer, der schon mal die grobe Sehrichtung vorselektiert. Weil Kacheln platzsparender und einfacher zu errichten sind als Drahtpyramiden, kommen sie im höheren Frequenzbereich zum Einsatz, wo mehr Antennen pro Flächeneinheit nötig sind. Jede Station besitzt ein Antennenfeld pro Frequenzbereich und kann beliebig zwischen ihnen hin- und herschalten.

Ursprünglich wollten wir in den Niederlanden 77 Antennenfelder mit je 96 Einzelanten-

nen pro Frequenzband errichten. Weil die Entwicklung teurer geworden war als geplant, kam es im Sommer 2007 zu einem unangenehmen Kassensturz. Man beschloss, die Rechenkapazität beizubehalten, in den Niederlanden aber nur noch 36 Stationen mit je 48 Antennenelementen pro Frequenzband zu bauen. Dadurch geht zwar die Empfindlichkeit zurück, durch die kleineren Abmessungen der Antennenfelder vergrößert sich aber auch das Sichtfeld, so dass wir mehr Objekte gleichzeitig beobachten können. Die Geschwindigkeit, mit der sich der Himmel durchmustern lässt, sinkt also nur geringfügig.

Unterdessen nahte Unterstützung von anderer Seite. Ein europäisches Netzwerk wird bis zu 16 weitere LOFAR-Stationen mit der vollen Größe von 96 Antennen pro Station aufbauen. Vorreiter ist Deutschland, wo sich zehn Institute zu einem Konsortium zusammenschlossen und bald fünf Stationen in Betrieb sein werden. Die erste internationale LOFAR-Station ging Ende 2007 in Effelsberg in unmittelbarer Nähe des 100-Meter-Spiegels in Betrieb, weitere in Garching, Jülich, Potsdam und Tautenburg folgen bald. Die übrigen Stationen zeigt die Karte auf S. 27. Am Ende, so unsere Erwartungen, werden rund 3000 Pyramidenantennen und 50 000 gekreuzte Dipole über den Kontinent verteilt sein.

Ein Fanhaar in der Nordkurve

Die Dichte der Stationen wird mit ihrem Abstand vom LOFAR-Kern abnehmen. Geplant sind sechs Stationen innerhalb eines Umkreises von 350 Metern, zwölf Stationen in bis zu zwei Kilometer Abstand, weitere 18 in bis zu 100 Kilometer Entfernung und bis zu 16 im restlichen Europa. Die Antennen im 350-Meter-Umkreis liefern bei einer Frequenz von 200 MHz eine Auflösung von 15 Bogenminuten, das entspricht gerade einmal dem halben Durchmesser des Monds am Himmel. Nach außen hin wird die Auflösung immer besser. Bei zwei Kilometer Abstand zum Kern erreicht man schon 2,5 Bogenminuten, bei 100 Kilometer drei Bogensekunden und bei europäischen Stationen in bis zu 1000 Kilometer Entfernung liegt sie bei 0,3 Bogensekunden. Ein Fußballfan im Oberrang der Südkurve des Kölner Rheinenergiestadions mit einer solchen Sehschärfe könnte jedes einzelne Haar eines Fans im Gastblock der Nordkurve sehen. Jetzt müssen Sie nur noch überlegen, wie viele Haare in ein Stadion passen, um zu erahnen, wie viele Radioquellen sich am Himmel unterscheiden lassen.

Nun gut, werden Sie denken. Aber all das soll mit einer Menge von Drähten und gekreuzten Stabantennen funktionieren? Kein tonnenschwerer Stahlkoloss, sondern eine Software? Das (englische) Zauberwort heißt *phased array*. Das Prinzip solcher phasengesteuerter Antennenfelder ist aus der Radartechnik bekannt, wird heute aber dank leistungsfähiger Computer selbst den hohen Ansprüchen der Astronomen nach Flexibilität und Frequenzbreite gerecht. Phasengesteuerte Antennenfelder benötigen zwar noch immer reale Antennen, die aber werden auf das absolut Notwendige reduziert. Das grundlegende Radioempfangselement ist eine Dipolantenne: im Wesentlichen zwei in einer gemeinsamen Achse angeordnete Metallstäbe oder -drähte, in denen Ladungsträger durch eintreffende elektromagnetische Wellen zum Schwingen entlang

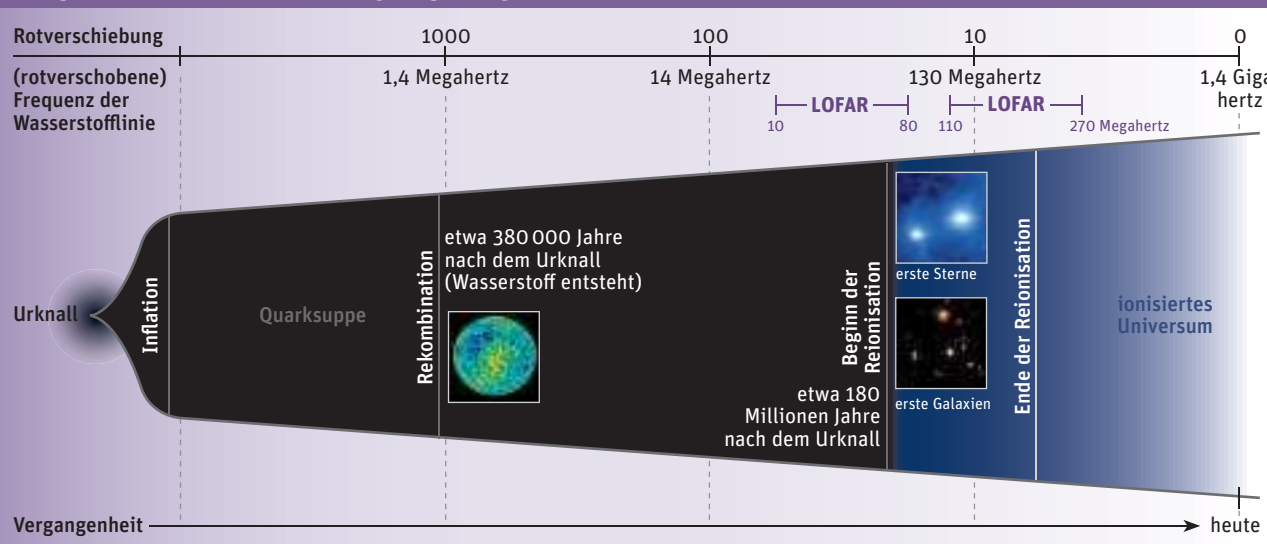
Zielen mit der digitalen Richtkeule

Mathematisch betrachtet nimmt der Teleskopspiegel an den einfallenden Wellen eine Fouriertransformation vor. Diese mathematische Methode spielt daher auch bei Aufnahmen im Radiolicht eine große Rolle. Zumindest die Richtcharakteristik eines *phased array* kann man sich aber auch ohne Fourier-Mathematik verdeutlichen. Stellen wir uns eine kleine helle Radioquelle in sehr großem Abstand von der Erde vor. Ihre Radiowellen treffen als ebene Wellenfronten auf der Erde ein. Steht die Radioquelle genau senkrecht über einem ebenen Antennenfeld, erreichen ihre Wellen die Antennen überall gleichzeitig. Wandert die Radioquelle durch die Erddrehung nun ein Stück zur Seite, zum Beispiel nach Westen, treffen auch die Wellen von der Seite ein, erreichen eine Antenne im Westen des Felds also früher als eine im Osten. Man müsste das Antennenfeld daher entsprechend kippen, um die Strahlen zu fokussieren.

Doch die Zeitverzögerung zwischen den Ankunftszeiten ist geometrisch durch die Einfallsrichtung der Welle, den Abstand der Antennen und die Lichtgeschwindigkeit genau festgelegt. Man kann also, statt das Feld zu kippen, die Zeitverzögerung kompensieren. Im Rechner verschiebt man hierzu die gespeicherten digitalen Datenströme der beiden Antennen um einen entsprechenden Faktor gegeneinander und addiert sie dann, lässt also virtuelle Wellen miteinander interferieren. Die Signalanteile, die aus der vorgegebenen Richtung kommen, addieren sich dabei konstruktiv, weil ihre Wellenberge und Wellentäler genau aufeinanderliegen. Signale aus anderen Richtungen mitteln sich hingegen weg, weil Wellenberge und -täler in zufälliger Weise verteilt sind und sich gegenseitig aufheben. Dieser statistische Prozess ist natürlich umso effektiver, je mehr einzelne Antennen miteinander kombiniert werden. Schließlich erhält man ein Antennenfeld, dessen Richtempfindlichkeit man sich als keulenförmigen Sehstrahl vorstellen kann. Der Öffnungswinkel der Keule wird kleiner, wenn der Radius des Antennenfelds wächst oder die Frequenz zunimmt.

Der Vorteil dieser digitalen Richtkeulenbildung *(digital beamforming)* ist enorm. Keine Mechanik schaltet so schnell und flexibel wie ein Computer. Große schwerfällige Stahlkonstruktionen lassen sich durch große Rechenleistung ersetzen – und durch simple Drähte, die nicht einmal bewegt werden müssen. Daher können Beobachter sogar von kosmischen Teilchen ausgelöste Radioblitze entdecken, die nur wenige milliardstel Sekunden dauern. Ein Teleskop aus Stahl und Eisen müsste sich zu diesem Zweck schneller drehen als es Einstein erlaubt. Ein virtuelles Teleskop speichert stattdessen einfach die Strahlung des ganzen Himmels – und wer will, kann im Nachhinein einfach noch mal genauer in eine bestimmte Richtung schauen.

Das Zeitalter der Reionisation



Nach dem urknall war der Kosmos lange Zeit nachtschwarz. Erst der Beginn der Reionisation, als das ultraviolette Licht der ersten Sterne das Wasserstoffgas zu ionisieren begann, markierte das Ende der dunklen Ära. Seither wurde das meiste Gas im Universum ionisiert und die 21-Zentimeter-Linie des Wasserstoffs »ausgedünnt«. Strahlung von Wasserstoffatomen aus der Zeit vor der Reionisation ist jedoch noch immer im Kosmos unterwegs, aber so stark rotverschoben, dass ihre Frequenz bei nur noch 130 Megahertz liegt. Kann LOFAR sie nachweisen, werden seine Daten Aufschluss über den Beginn der Reionisation geben können.

GRAFIK: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; EINGEBAUTE BILDCHEN LINKS UND RECHTS OBEN: NASA / WMAP; RECHTS UNTEN: NASA / ESA, STSCI

der Dipolrichtung angeregt werden. Der so entstehende Wechselstrom lässt sich in der Mitte zwischen den Dipolhälften abgreifen, verstärken und messen.

Allerdings empfangen Dipolantennen Strahlung fast immer gleich gut, egal aus welcher Himmelsrichtung sie kommt. Sie eignen sich also kaum, um den Ursprungsort bestimmter Quellen festzustellen, so dass wir zusätzlich eine Richtcharakteristik benötigen. Bei einem Radioteleskop alter Schule, das wie eine Satellitenschüssel funktioniert, werden die Radiowellen von der Schüssel reflektiert und im Brennpunkt fokussiert. Weil nur Wellen aus einer bestimmten Richtung den Brennpunkt treffen, lässt sich so die Strahlungsintensität an der entsprechenden Stelle des Himmels messen. Durch leichtes Schwenken oder Nicken der Schüssel streicht die Richtungskeule des Teleskops über die Radioquelle hinweg, wodurch sich deren Intensitätsverteilung bestimmen lässt. Im Prinzip ist ein normales Radioteleskop also nur ein Ein-Pixel-Scanner und daher sehr ineffektiv, um große Himmelsgebiete abzubilden.

Ein digitales *phased array* ersetzt die große reflektierende Schüssel durch ein Feld *(array)* einzelner kleiner Antennen, die jede für sich fast den ganzen Himmel auf einmal erfassen. Die elektromagnetische Welle wird nicht mehr an der Teleskopoberfläche reflektiert, sondern von den Dipolen direkt in Strom- und Spannungsschwankungen umgesetzt. Gott sei Dank sind Radiowellen so energiearm, dass man sie als klassische Wellen betrachten und daher auch exakt in digitaler Form speichern kann. Danach, und das ist der Clou, ist eine Schüssel überflüssig, denn nun können wir die Radiowellen gewissermaßen digital verlängern und in einem virtuellen Brennpunkt miteinander kombinieren. Weil sich digitale Kopien nicht abnutzen, lässt sich dieser Vorgang beliebig oft wiederholen und der Brennpunkt am Himmel nach Wunsch verschieben. Mit einer einzigen Messung können wir also in viele Richtungen gleichzeitig schauen.

»Dunkle« Fenster in der Galaxis

Dank dieser Technik und einer Sammelfläche von einigen zehntausend Quadratmetern (siehe Kasten links) besitzt LOFAR enorme Fähigkeiten, um den Kosmos im Radiolicht zu untersuchen. Mit Hilfe der berühmten 21-Zentimeter-Linie des Wasserstoffatoms könnten wir sogar eindeutige Hinweise darauf finden, wann und wie der Übergang von einem dunklen Kosmos zu unserem heutigen leuchtenden Universum verlaufen ist.

Wasserstoff ist das häufigste Element im Kosmos. Letztlich entstanden alle Sterne und Galaxien aus großen Wasserstoffwolken. Quantenmechanisch betrachtet kann das Elektron im Wasserstoffatom zwei Spin-Zustände mit je unterschiedlicher Rotationsachse und geringfügig unterschiedlichen Energieniveaus besitzen. Dreht sich der Spin eines Elektrons um, weil es zum Beispiel mit einem anderen Teilchen kollidiert, gleicht das System die Energie-

SAMMELFLÄCHE

Die effektive Sammelfläche, auf der ein gekreuzter Dipol Strahlung registriert, beträgt ungefähr die halbe beobachtete Wellenlänge zum Quadrat. Beobachtungen bei einer Wellenlänge von zwei Metern (150 MHz) machen daher schon zehntausende Dipole erforderlich. Die 36 niederländischen LOFAR-Stationen weisen in diesem Bereich eine Sammelfläche von rund 30 000 Quadratmetern auf. Die geplanten 16 internationalen LOFAR-Stationen werden 20 000 weitere Quadratmeter hinzufügen.

differenz aus, indem es ein Photon entsprechender Energie absorbiert oder emittiert. Solche Photonen besitzen eine Frequenz von 1,4 GHz und tauchen im Radiospektrum als scharfe Linie bei der entsprechenden Wellenlänge von 21 Zentimetern auf.

Die 21-Zentimeter-Linie lässt sich zwar auch mit klassischen Radioteleskopen entdecken, dann nämlich, wenn sich das beobachtete Wasserstoffgas in unserer kosmischen Umgebung befindet. Beobachtet man aber weit entfernte Objekte aus der kosmischen Frühzeit, ist deren Licht stark rotverschoben. Die Rotverschiebung, also das Verhältnis zwischen Frequenzverschiebung und gemessener Frequenz, wird mit dem Parameter z angegeben. Der erste Wasserstoff entstand ungefähr 400 000 Jahre nach dem Urknall, seine Strahlung weist eine Rotverschiebung z von etwa 1000 auf.

Während der ersten Milliarde Jahre begann sich der Wasserstoff unter dem Schwerkrafteinfluss Dunkler Materie zusammenzuballen und bildete die ersten Sterne und Galaxien. Kaum waren die ersten Sterne entstanden, zerstörten sie aber schon den Stoff, aus dem sie gemacht waren: Ihre heiße ultraviolette Strahlung begann, die Wasserstoffatome zu ionisieren. Die Epoche, in der das geschah, nennt man das Zeitalter der Reionisation (siehe Bild links), man vermutet sie bei einer Rotverschiebung von etwa 10. Während alle jüngeren kosmischen Regionen komplett ionisiert sind, müsste die (stark rotverschobene) Wasserstofflinie aus der Zeit vor der Ionisierung bei einer Frequenz von rund 130 MHz noch sichtbar sein. Doch die erwartete Radiostrahlung ist so schwach, dass ein Teleskop die Sammelfläche (siehe links) zweier Fußballfelder benötigt, um sie zu entdecken. LOFAR bringt diese Fläche allein in seinem Kern auf. Zusätzlich aber wird die Radiostrahlung von viel stärkeren Signalen etwa aus der Milchstraße überlagert. Wir müssen also nach Fenstern suchen, in denen die Galaxis besonders schwach strahlt.

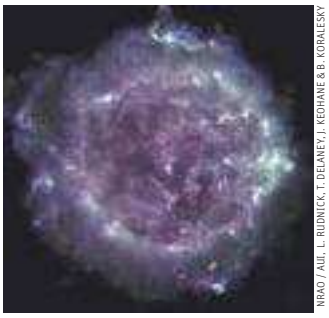
Zur großen Überraschung der ersten Radioastronomen erwies sich auch die kosmische Synchrotronstrahlung als wichtige Quelle von Strahlung niedriger Frequenzen. Sie entsteht, wenn energiereiche Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit durch ein Magnetfeld rasen und von diesem durch die Lorentz-Kraft auf eine Spiral- oder Kreisbahn gezwungen werden. Weil die Elektronen dabei in Richtung des Kreiszentrums beschleunigt werden und beschleunigte Ladungen immer strahlen, führt dieses Phänomen bei hohen Energien zur Synchrotronstrahlung. Besonders interessant ist deren steiles Spektrum: Hin zu niedrigen Frequenzen wird sie schnell intensiver und ist daher im Radiobereich besonders gut zu sehen.

SCHÖNHEITEN IM RADIOLICHT

Vieles, was im Optischen unsichtbar bleibt, enthüllen Aufnahmen im Radiowellenbereich. Eine kleine Auswahl:

RENSE BOOMSMA, UNIVERSITÄT GRONINGEN

1 Die Galaxie NGC 6946 im Licht der 21-cm-Linie des Wasserstoffs. Helle blaue Gebiete stehen für hohe, dunkle Stellen für niedrige Gasdichten. Die runden Blasen könnten das Ergebnis von Teilchenwinden sein, die von massereichen Sternen oder Supernovae ausgehen. Die Spiralarme aus Wasserstoffgas reichen weit über das optische Bild (weiße Bereiche in der Mitte) hinaus.



NRAO / AUI, L. RUDNICK, T. DELANEY, J. KEOHANE & B. KORALESKY

2 Cassiopeia A ist eine der hellsten Radioquellen am Himmel, nachdem dort vor über 300 Jahren ein Stern als Supernova explodierte. Die Radioaufnahme ist eine Überlagerung von Aufnahmen bei drei Frequenzen (1,4, 5,0 und 8,4 Gigahertz). Die hellen Bereiche markieren Materie, die sich seit der Explosion nach außen bewegt.

wichtige **online** **adressen**

Brainlogs
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de

Foto-Scout-Zuse
Die lernende Bildsuchmaschine für Ihren PC.
www.foto-scout-zuse.com

Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de

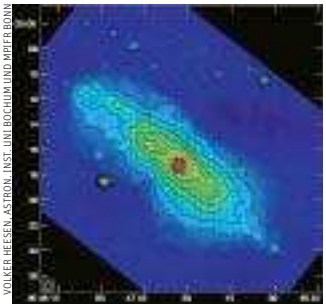
KOSMOpod
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de

Portraits, Interieurs, Landschaften, Figurativa u. a.
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska
– Kunstmalerin –
www.kwasniewska.com

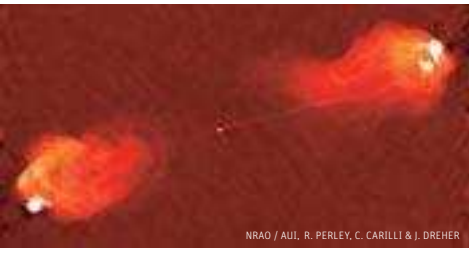
Die neue Art zu Präsentieren
Wissenschaft verständlich erklären
Projekte überzeugend präsentieren
www.präsentationscoach.de/wissenschaft

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

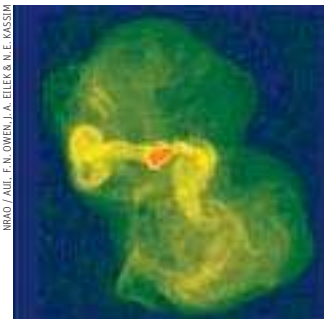
GWP media-marketing
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: s.foerster@vhb.de


VOLKER HEESEN, ASTRON, INST. UNI BOCHUM UND MPIFR BONN

3 Der Radiohalo der Galaxie NGC 253, auf die wir von der Seite blicken, wird bei 4,6 GHz sichtbar. Die Striche geben die Orientierung der Magnetfelder an. Außerhalb der Galaxienebene werden die Magnetfelder durch einen galaktischen Wind verbogen.


NRAO / AUI, R. PERLEY, C. CARILLI & J. DREHER

4 Die berühmten Radioblasen der Galaxie Cygnus A bilden sich dort, wo Teilchenjets aus dem Zentrum der Radioquelle (Bildmitte) im intergalaktischen Raum abgebremst werden und sich auflösen.


NRAO / AUI, F.N. OWEN, J.A. EILEK & N.E. KASSIM

5 Die elliptische Riesengalaxie M 87 im Zentrum des Virgogalaxienhaufens gehört zu den hellsten Radioquellen. Der Radiobereich misst etwa 3000 Lichtjahre im Durchmesser. In seinem Inneren sitzt unsichtbar ein Schwarzes Loch, von dem ein Strom fast lichtschneller Teilchen ausgeht. Bevor man dieses Bild bei niedrigen Frequenzen aufnahm, war nur der rot gefärbte Bereich bekannt.

Die Kombination relativistischer Teilchen, die durch kosmische Magnetfelder rasen, erwies sich bald als relativ häufig. Die Teilchen sind offenbar das Produkt gigantischer kosmischer Teilchenbeschleuniger, die ihre Energie aus explosiven Prozessen beziehen. Auch das Leuchten der Milchstraße im Radiolicht scheint das Ergebnis vieler vergangener Supernovae. Dabei implodiert ein ausgebrannter Stern und kollabiert unter seinem eigenen Gewicht zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. Gleichzeitig wird eine kräftige Schockwelle in das interstellare Medium geschleudert, wo sie Elektronen beschleunigt und kosmische Magnetfelder komprimiert. Die beschleunigten Elektronen verteilen sich in den Galaxien und geben ihre Energie als Synchrotronstrahlung wieder ab. Einigen gelingt es, das System zu verlassen, vor allem dann, wenn viele Supernovae so hohen Druck aufbauen, dass ein »galaktischer Wind« aus Teilchen, Gas und Magnetfeldern entsteht. Im Seitenanblick schmückt sich eine solche Galaxie mit einem gewaltigen Radiohalo (Bild 3).

Tatsächlich sind die Halos noch viel größer und reichen weit in den intergalaktischen Raum hinein. Doch leider verlieren die Elektronen beim Verlassen ihrer Heimatgalaxie schnell Energie und können die Magnetfelder nicht mehr »beleuchten«. Hier liegt eine weitere Stärke von LOFAR, weil es auf niedrigen Frequenzen die Strahlung der energieärmeren Elektronen misst, die eine wesentlich längere Lebensdauer von bis zu einigen Milliarden Jahren besitzen. Dank LOFAR werden die Galaxien in ihrer wahren Größe erstrahlen und sich als bis zu zehnmal größer als bisher bekannt erweisen. Vielleicht gelingt es dem Schlüsselprojekt zum Magnetismus sogar, Magnetfelder im intergalaktischen Raum nachzuweisen und herauszufinden, ob das gesamte Universum magnetisiert ist.

Auch Schwarze Löcher verursachen starke Synchrotronstrahlung. Sie erzeugen heiße, magnetisierte Plasmastrahlen, die sich mehrere Millionen Lichtjahre weit in den Raum erstrecken können und helle Radiostrahlung mit einem ebenfalls steilen Spektrum emittieren. Inzwischen gelten auch diese Jets als heiße Kandidaten für den Ursprung der besonders energiereichen kosmischen Strahlung, die aus relativistischen Elementarteilchen mit Energien über 10^{19} eV besteht (SdW 1/2008, S. 19).

Entstehungsort der Jets ist die direkte Umgebung eines Schwarzen Lochs. Wahrscheinlich werden sie von natürlichen Dynamos angetrieben, die sich bilden, wenn das Gas vom Schwarzen Loch angezogen und dabei in schnelle Rotation versetzt wird. Die Bewegungsenergie der Jets kann die Energie, die alle Sterne einer Galaxie gleichzeitig im niederfrequenten Radiobereich abstrahlen, um ein Mehrfaches übertreffen. Weil Radiojets dank ihrer hohen Radioleuchtkraft weithin sichtbare kosmische Leuchtfeuer sind, müssten sie auch noch bei $z = 10$, dem Zeitalter der Reionisation, und darüber hinaus beobachtbar sein. Mit ihrer Hilfe finden wir möglicherweise auch die ersten aktiven Schwarzen Löcher im Universum. Diese nämlich sind wahre Stecknadeln im kosmischen Heuhaufen, zumindest wenn man ihn bei hohen Frequenzen durchleuchtet. Wegen ihres steilen Radiospektrums, einer besonderen spektralen Form im Niederfrequenzbereich und der Rotverschiebung lassen sich diese Urlöcher am besten mit Niederfrequenzteleskopen finden.

Mit der Energie eines Squashballs

Auch kohärente Strahlungsprozesse werden die Radioastronomen mit LOFAR ins Visier nehmen. Sie entstehen, wenn Elektronen quasi im Takt strahlen und sich die Radiowellen gegenseitig verstärken. Die abgestrahlte Leistung steigt dann nicht mehr nur linear mit der Anzahl der Teilchen, sondern quadratisch. Die Genauigkeit, mit der sich die Elektronen im Takt bewegen müssen, ist dabei proportional zur Frequenz; niederfrequente Wellen finden also leichter einen gemeinsamen Takt.

Ein wichtiges Beispiel kohärenter Strahlung entdeckten wir erst vor einigen Jahren. Am Forschungszentrum Karlsruhe war das von einem von uns (Falcke) initiierte und geleitete LOFAR-Vorgängerexperiment LOPES in Betrieb gegangen. Mit ihm gelang uns der Nachweis nur nanosekundenlanger und völlig unvorhersehbar am Himmel erscheinender Radioblitze, die vom Aufprall kosmischer Teilchen auf die Erdatmosphäre herrühren.

Der Ursprung dieser Teilchen wird noch diskutiert, erneut sind aber Supernovae und Jets von Schwarzen Löchern die heißesten Kandidaten. Einige der Partikel erreichen Energien von bis zu 10^{20} eV. Protonen bewegen sich also mit 99,99999999999999999995 Prozent der Lichtgeschwindigkeit und konzentrieren die Energie eines schnellen Squashballs auf der Skala eines Elementarteilchens.

Trifft ein solches Teilchen auf Atomkerne in der Erdatmosphäre, kommt es in der Elementarteilchenwelt zu einer Art umgekehrter Massenkarambolage. Aus der Energie des einfallenden Teilchens entsteht ein Schauer von 100 Milliarden neuer Teilchen, die in pfannkuchenförmiger Formation – rund zwei Meter dick und mit einem Kilometer Durchmesser – auf den Beobachter zufliegen. Wie im Fall der Synchrotronstrahlung werden die Elektronen durch das Erdmagnetfeld abgelenkt und er-

LOFAR auf dem Mond

Für Radioastronomen sind sie ein Ärgernis: die freien Elektronen in den obersten Schichten unserer Atmosphäre. In der turbulenten Ionosphäre nämlich werden Radiowellen im Frequenzbereich oberhalb von 10 bis 30 Megahertz an ihnen gebrochen. Kosmische Radioquellen beginnen dann, scheinbar am Himmel hin- und herzuwandern – das Seeing, wie Astronomen sagen, wird schlechter. Dieser Effekt ist auch von optischen Wellenlängen bekannt, wenn ferne Autoscheinwerfer über heißem Asphalt flackern oder Sterne am Nachthimmel »blinken«. Je niedriger die Frequenz, desto stärker der Effekt. Bei LOFAR muss er mit digitaler adaptiver Optik mühsam herauskalibriert werden, doch auch diese Maßnahme hat ihre Grenzen. Für hochpräzise Vermessungen der kosmischen Epoche der Reionisation, als das Licht der ersten Sterne die Wasserstoffatome in ihrer Umgebung ionisierte, wird das Seeing ein limitierender Faktor sein.

Unterhalb von 10 bis 30 MHz, abhängig von Tageszeit und Sonnenaktivität, lässt sich der Radiohimmel überhaupt nicht untersuchen, denn bei diesen Frequenzen wirkt die Ionosphäre wie ein gigantischer, erdumspannender Spiegel, der die eintreffende Radiostrahlung vollständig reflektiert.

BEIDE: ILLUSTRATIONEN: LUNAR LOFAR

Robotische Rover verlassen eine Mondlandefähre, um Dipolantennen auszulegen, zum Beispiel im Krater Daedalus auf der Mondrückseite. Ein erstes »Lunar LOFAR« könnte schon im nächsten Jahrzehnt errichtet werden (Illustration).

Die einzige Möglichkeit, Probleme mit dem Radio-Seeing und der Reflexion in der Ionosphäre zu vermeiden, ist der Bau eines Radioteleskops im Weltraum – eines ziemlich großen, denn lange Radiowellen verlangen nach großen Teleskopen. Doch selbst das ist noch keine gute Lösung, denn schon die ersten Satellitenexperimente zeigten, dass die Erde im niederfrequenten Bereich selbst stark strahlt. Ein Radioteleskop wäre im Erdorbit also kaum besser untergebracht als ein optisches Teleskop auf der Sonne, da es in beiden Fällen niemals »Nacht« würde.

Der beste Platz für ein Langwellenteleskop ist daher die Rückseite des Monds. Dort ist der Untergrund stabil genug, um Antennen zu tragen, der Boden hat optimale dielektrische Eigenschaften, so dass man Antennen einfach flach auf dem Boden auslegen kann, und das Teleskop ist vor allen künstlichen und natürlichen Störstrahlungen der Erde (und für die Hälfte der Zeit auch vor jenen der Sonne) geschützt. Die Mondrückseite ist also eine perfekte radioleise Umgebung und wurde von der Internationalen Fernmeldeunion darum schon als Radioschutzzone für die Astronomie ausgewiesen.

Gemeinsam mit Experten des europäischen Raumfahrtunternehmens EADS Astrium und niederländischen Kollegen führte ich in den letzten Jahren eine Machbarkeitsstudie durch. Wir wollten herausfinden, welche astronomischen Vorhaben sich auf dem Erdtrabanten realisieren ließen. Das Prinzip von LOFAR, so zeigte sich, wäre ideal geeignet. Die Europäer könnten ein »Lunar LOFAR« mit rund 30 Kilometer Durchmesser, bestehend aus bis zu 33 einzelnen Antennen und ausgelegt für Beobachtungen unterhalb von 30 MHz, mit einer einzigen Ariane-V-Rakete auf den Mond transportieren. Das Teleskop selbst würde rund 400 Kilogramm wiegen – gerade mal ein Drittel der Nutzlast, die eine für den Flug auf der Ariane konzipierte Mondlandefähre transportieren kann. Ein kleiner robotischer Rover würde die Antennendrähte auslegen. Nicht einmal der Mondstaub würde Probleme bereiten, denn bewegliche mechanische Elemente sind überflüssig. Die bislang größte Herausforderung für ein Mondteleskop ist jedoch seine Energieeffizienz. Tagsüber lässt sich die nötige Leistung von rund einem halben Kilowatt problemlos generieren. In der zweiwöchigen Mondnacht könnten herkömmliche Batterien dies aber nicht leisten, dann müsste die Beobachtungszeit stark eingeschränkt werden.

Derzeit prüft die Europäische Weltraumorganisation Esa in einer Machbarkeitsstudie die Möglichkeit, eine kleine Mondlandefähre am lunaren Südpol abzusetzen, die unter anderem ein aus zwei Antennen bestehendes Radiointerferometer (»Lunar Radio Explorer«) an Bord hat. Der Plan: Eine Radioantenne bleibt auf der Landefähre zurück, die andere entfernt sich auf dem Rover immer weiter. Im Lauf einiger Monate würde die Bewegung des Rovers auf dem sich drehenden Mond zu einer Spiralfigur im Raum führen. So ließe sich erstmals ein Radiobild des gesamten Südhimmels bei niedrigen Frequenzen aufnehmen. Schon mit relativ wenig Aufwand könnte die Astronomie so vollkommenes Neuland betreten.

Jüngst gab auch die US-Weltraumbehörde NASA eine Vorstudie in Auftrag. Ein Teleskop auf dem Mond, das noch größer ist als LOFAR, soll den Urwasserstoff im »dunklen Zeitalter« des Universums, also noch vor der Geburt der ersten Sterne, im Detail vermessen. Theoretische Überlegungen weisen nämlich darauf hin, dass in diesen Radiosignalen die entscheidenden Parameter des frühen Universums mit großer Präzision eingebrannt sind. Die Anzahl der für diese Messungen benötigten Antennen ist wegen der erforderlichen Empfindlichkeit allerdings sehr groß. Auf ein Riesenmondteleskop darf man daher nicht ungeduldig warten. Kleine Vorläufer aber könnten vielleicht schon im nächsten Jahrzehnt ihren Betrieb aufnehmen. H.F.

Mit dem »Square Kilometre Array« (SKA) ist bereits die nächste Generation von Radioteleskopen in Planung. Ab 2012 sollen kleine Radioschüsseln (Hintergrund) und weiterentwickelte Dipolantennen nach LOFAR-Vorbild (Vordergrund) in Australien oder Südafrika verteilt werden. Das Bild zeigt die schon für 2015 geplante Kernstation mit etwa fünf Kilometer Durchmesser.

ILLUSTRATION: SKA PROJEKTBÜRO / XILOSTUDIOS

zeugen Radiowellen. Da bei Frequenzen um 100 MHz die Wellenlänge mit rund drei Metern größer ist als die Dicke des Emissionsgebiets, wird diese Strahlung kohärent verstärkt. Die Folge ist ein Blitz, der im Radiobereich tausendmal heller leuchtet als die Sonne, nur ein Hunderttausendstel so lange dauert wie ein Gewitterblitz und genaue Informationen über das auslösende Teilchen enthält.

Die ersten 96 Antennen, die das Zentrum des LOFAR-Teleskops bilden, stehen nun in der Nähe des kleinen Städtchens Exloo in der niederländischen Provinz Drenthe, 20 Kilometer westlich der deutschen Grenze. Hier ebenso wie in Effelsberg laufen bereits erste Tests. Die nächsten 19 niederländischen sowie Felder in Deutschland, England, Frankreich und Schweden wurden gerade in Auftrag gegeben. Bis Ende 2010 folgen die weiteren Stationen. Ab 2009, noch während das Teleskop wächst, sind aber schon Beobachtungen möglich.

Wie eine Installation von Christo

Leider wird am Ende keine große Schüssel zu sehen sein, die sich majestätisch über unsere Köpfe hinwegbewegt. Nur ein paar stumme Drahtantennen und merkwürdig verpackte flache Antennenkacheln, die eher an eine künstlerische Installation von Christo als an ein Radioteleskop erinnern, zeugen dann von LOFAR. Unscheinbar ist auch dessen vier Quadratkilometer großer Kern. In den letzten Jahren diente das Gebiet als Ackerland, nun sollen seine ungenutzten Bereiche in ein Naturgebiet zurückverwandelt werden. Die eigentliche Arbeit wird anderswo stattfinden: Verteilt über ganz Europa dürften Wissenschaftler schon bald nervös an ihren Bildschirmen sitzen, auf die ersten Daten warten und über die unzähligen Software-Bugs schimpfen, die von einem virtuellen Teleskop zu erwarten sind. Trotzdem hoffen sie alle, etwas völlig Neues und Unerwartetes zu entdecken – denn eins ist klar: Ein Teleskop mit solch vielfältigen Möglichkeiten besaß bislang noch niemand.

Doch LOFAR wird nicht das einzige Teleskop dieser Art bleiben. Zurzeit bauen Kollegen aus den USA, Australien und Indien das Murchison Widefield Array in Australien. Es besitzt zwar weniger Antennen, ist aber ausschließlich für die Untersuchung der Reionisation ausgelegt. Darüber hinaus arbeiten Radioastronomen schon an der nächsten LOFAR-Generation. Das »Square Kilometre Array« SKA, das ab 2012 in Südafrika oder Australien entstehen könnte, soll eine Sammelfläche von einem Quadratkilometer besitzen und aus kleinen Radioschüsseln und LOFAR-ähnlichen *phased arrays* bestehen (siehe Bild oben). Damit wird man noch weiter in die Tiefen des Weltalls vorstoßen als jemals zuvor und Dinge sehen, die uns kein optisches Teleskop je zeigen könnte.

Bei Frequenzen unterhalb von 10 MHz existiert aber auch künftig ein weiter und bis heute völlig unerschlossener Bereich, denn ab dieser Grenze wird die Ionosphäre der Erde undurchsichtig. Wollen wir das Universum bei den längsten Wellenlängen beobachten, müssen wir LOFAR eines Tages im Weltraum bauen – am besten auf der Rückseite des Mondes (siehe Kasten S. 33). Sollte die geplante Rückkehr zu unserem nächsten Nachbarn im Weltraum Wirklichkeit werden, dann könnte es sein, dass LOFAR irgendwann auch auf den Mond geschossen wird. ◁

Heino Falcke lebt in Frechen bei Köln und ist Professor für Radioastronomie und Astroteilchenphysik an der niederländischen Radboud-Universität Nijmegen und am Niederländischen Forschungsinstitut ASTRON. Vorige Stationen waren die Universität Bonn, das MPI für Radioastronomie (MPIfR) sowie Universitäten in Arizona und Maryland. Falcke wirkt seit Beginn an der LOFAR-Entwicklung mit, er hatte auch den Bau des Prototyps LOPES angeregt und geleitet und gehört dem Team des MoonNext-Projekts der Esa an. Er veröffentlichte rund 300 theoretische Arbeiten etwa über die Physik Schwarzer Löcher. **Rainer Beck** lebt in Bornheim bei Bonn und ist seit 1980 wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPIfR und Experte für kosmische Magnetfelder. Er ist LOFAR-Projektwissenschaftler am MPIfR, Sekretär des »German Long Wavelength Consortium« und leitet das LOFAR-Schlüsselprojekt »Kosmischer Magnetismus«. In einem inter-nationalen Wissenschaftlerteam erarbeitet er zudem Spezifikationen für das SKA.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957491.

LOGARITHMISCHE SKALEN II

Alle Tiere der Welt und die Staatsverschuldung in Dezibel

Logarithmische Skalen dienen der Übersicht über viele Größenordnungen – und der Verharmlosung.

Von Norbert Treitz

Um Noah, der mit dem Schiffsbau weit hinter dem Terminplan liegt, etwas aufzuhelfen, übermittelt ihm Gott (durch göttliche Eingebung) die moderne Dezimalschreibweise für Zahlen, einschließlich des Kommas zum Notieren gebrochener Zahlen. Während schwarze Wolken den 40-tägigen Dauerregen ankündigen und Noah die letzten Planken seiner Arche verpicht, kommt ihm die Idee, seine neuerworbenen Fähigkeiten zur Buchführung zu nutzen. Beim Einchecken vermisst er jedes Tier mit seiner Elle, notiert dessen Körperlänge und wirft einen Kieselstein in einen von neun Körben, je nachdem, mit welcher Ziffer das Messergebnis beginnt – und wundert sich, dass der Einserkorb sich viel schneller füllt als alle anderen.

Sein jüngster Sohn Japhet beobachtet das seltsame Treiben mit einem gewissen Misstrauen und fühlt sich in der Befürchtung bestätigt, dass der 600 Jahre alte Herr in der letzten Zeit etwas abgebaut habe. Warum sollen Körperlängen zwischen, sagen wir, einer und zwei Ellen häufiger vorkommen als andere? Der Junior, der sich mit seinen 570 Jahren noch richtig fit fühlt, vermutet einen systematischen Fehler und wiederholt die Messreihe, wählt aber vorsichtshalber als Maßeinheit nicht die Elle, sondern die Handspanne oder auch halbe Elle. Zu seiner Überraschung landen auch diesmal im Einserkörbchen wesentlich mehr Kiesel als in jedem anderen.

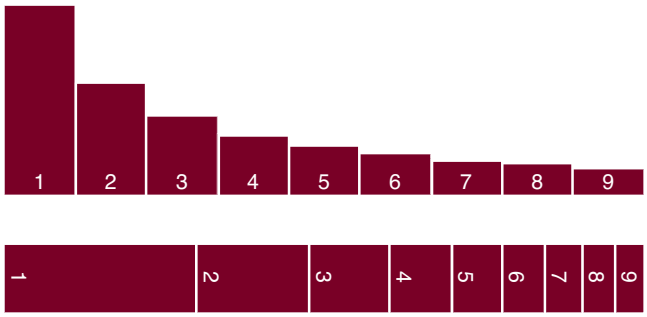
An einem langweiligen Regentag auf hoher See setzen Vater und Sohn sich zusammen und lösen das Rätsel: Alle die relativ handlichen Tiere, die Noah mit 0,5 bis 0,99… Ellen vermessen hatte (eine Elle waren etwa 45 Zentimeter), werden von Japhet als 1 bis 1,99… Handspannen lang sortiert. Also geraten alle Kiesel aus Noahs Körbchen 5 bis 9 in Japhets Korb 1; kein Wunder, dass der ziemlich voll wird. Entsprechendes gilt für das Krabbelgetier von 0,05 bis (knapp unter) 0,1 Ellen Körperlänge ebenso wie für die Elefantenklasse (mehr als fünf, aber weniger als 10 Ellen). Dagegen verteilt sich der Inhalt von Noahs Korb 1 bei Japhet auf die Körbe 2 und 3 (Kasten unten).

Das Phänomen beobachtet man nicht nur bei den Körperlängen von Tieren, sondern allgemein bei großen Mengen von Zahlen, die proportional zu physikalischen Größen und über viele Größenordnungen (das heißt hier Potenzen der verwendeten Ziffernbasis) verteilt sind. Es zeigt sich, dass die Breiten der Körbe sich verhalten müssen wie die Differenzen der Logarithmen benachbarter einstelliger Zahlen. Das ist das – 1938 formulierte – Gesetz von Frank Benford (1887–1948).

Anders gesagt: Die ersten Stellen der Logarithmen aller Zahlen nach dem Komma verteilen sich gleichmäßig auf zehn gleich breite Kästchen von 0 bis 9

Benfords Gesetz und die logarithmische Skala

Wenn Noah die Körperlängen aller Tiere auf seiner Arche misst, beginnen weit mehr Messwerte mit einer Eins als mit jeder anderen Ziffer – unabhängig von der Maßeinheit (unten, oberes Balkendiagramm). Um alle Körbe gleichmäßig zu füllen, muss Noah für die kleineren Anfangsziffern entsprechend breitere Körbe vorsehen (die Rechtecke aus der oberen Häufigkeitsverteilung sind einfach quergelegt). Die Anordnung der Körbe im Kreis (rechts) zeigt, dass



(und bei anderen Ziffernbasen als unserer Zehn entsprechend). Damit erklärt sich auch die Beobachtung Simon Newcombs zu den ungleichmäßig abgegriffenen Logarithmentafeln, mit denen diese Rubrik im vergangenen Monat endete (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 4/1994, S. 16).

Es ist plausibel, dass alle Intervalle, die ein festes Verhältnis zwischen Ende und Anfang haben (zum Beispiel 1,1 zu 1) gleich viele Kieselsteine enthalten. Das ist offenbar skaleninvariant, sprich unabhängig von der gewählten Maßeinheit. Die logarithmische Gleichverteilung erfüllt diese Skaleninvarianz.

Das Gesetz von Benford gilt nicht für beliebige Zahlenmengen. Gegenbeispiele sind:

- die Körperhöhen erwachsener Menschen, denn sie liegen in einem engen Bereich: Das Verhältnis zwischen dem größten und dem kleinsten Wert ist relativ klein;
- Einwohnerzahlen von Städten zwischen 25 000 und 100 000, aus demselben Grund;
- Telefonnummern, denn die Ziffern darin sind beliebige Zeichen, die nichts mit Größen zu tun haben.

Die neutrale Sieben

Vor einigen Jahren waren neutrale Flüssigseifen eine gute Alternative zur (etwas) ätzenden, nämlich alkalischen gewöhnlichen Seife. Mittlerweile bevorzugt man »hautneutrale« Seifen, die deswegen so gut verträglich sind, weil sie eben nicht neutral sind, sondern leicht sauer, sozusagen neutral relativ zur ebenfalls leicht sauren Haut. Auf der Flasche finden wir den pH-Wert 5,5. Was steckt dahinter? Wieder einmal Logarithmen!

Das Wassermolekül H_2O hat eine kleine, aber wichtige Tendenz, ein H^+-Ion abzuspalten. Das kann als armes Proton nicht allein herumschwimmen, sondern dockt an ein anderes H_2O an, das dadurch zum Oxonium H_3O^+ wird (früher auch Hydronium oder Hydroxonium genannt). Das verbleibende Ion OH- nennt sich (nach wie vor) Hydroxidion. Die Reaktionsbeziehung ist also $2\,H_2O \leftrightarrow H_3O^+ + OH^-$.

Für dynamische Reaktionsgleichgewichte haben Cato Maximilian Guldberg und Peter Waage 1864 ein Gesetz mit dem antiquierten Namen »Massenwirkungsgesetz« gefunden. Unter nicht allzu exotischen Bedingungen gilt für die in Mol pro Liter (1 mol sind rund $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen) gemessenen Konzentrationen p, dass $p(H_3O^+) \cdot p(OH^-)$ etwa 10^{-14} ist. In reinem und daher neutralem Wasser sind beide Faktoren gleich und müssen somit den Wert 10^{-7} haben. Von jeder der beiden Ionensorten sind also rund $6 \cdot 10^{16}$ Exemplare in einem Liter von immer noch neutralem Wasser.

Alkalische Stoffe wie NaOH bringen nun zusätzliche Hydroxidionen mit. Damit das obige Produkt wieder den richtigen Wert hat, muss die Menge der Oxoniumionen abnehmen. Umgekehrt geben Säuren H^+-Ionen ab und erhöhen damit die Oxonium-Konzentration, weswegen die Hydroxid-Konzentration abnimmt.

Die 5,5 aus der hautverträglichen Flüssigseife bedeuten nun (etwas vereinfacht), dass in einem Liter $10^{-5,5}$ Mol Oxoniumionen sind, also rund 32-mal so viele wie im neutralen Wasser. Hydroxid und Oxonium sind jetzt nicht mehr 1:1 vorhanden, sondern 1:1024 oder ausführlicher (1/32) : 32.

In der Bezeichnung »pH-Wert« deutet das p die Konzentration an (genauer: die Aktivität, was hier nicht näher diskutiert werden soll) und das H das Oxoniumion, das früher als H^+ gezählt wurde. Die entscheidende Einzelheit muss man sich ohne Buchstaben merken: Gemeint ist der negative Zehnerlogarithmus dieser Konzentration. Da hilft es auch nicht besonders viel, wenn man »p_H-Wert« statt »pH-Wert« schreibt. Werte über 7 bedeuten alkalisches (= basisches) Verhalten, solche unter 7 saures, und jede Stufe bedeutet einen Faktor 10 der Konzentrationen von Hydroxid und (gleichzeitig gegenläufig) Oxonium, also 100 für ihr Zahlenverhältnis.

Die pH-Skala ist in diesem Sinn auch für Laien handlich, wenn man einmal zur Kenntnis genommen hat, dass der Neutralpunkt die Sieben ist.

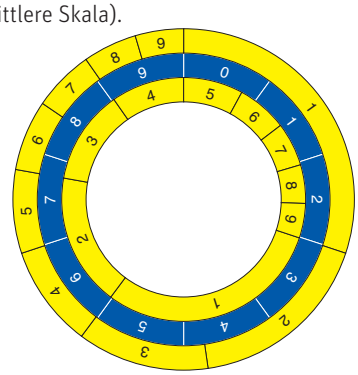
Tonhöhen und Frequenzen

Die abgegriffene Länge auf einer Saite ist umgekehrt proportional zu ihrer Schwingungsfrequenz, wie wir seit Marin Mersenne (1588 – 1648) wissen. Nun werden Töne fast immer von Obertönen mit ganzzahligen Vielfachen der Frequenz begleitet. Erklingen zwei Töne mit niedrigrationalem Fequenzverhältnis zugleich, so fallen viele von diesen Obertönen zusammen, was wir als Konsonanz empfinden. Darum sind Intervalle wie die Quint (Frequenzverhältnis 3 : 2) oder die große Terz (5 : 4) bei Hörern wie bei Komponisten sehr beliebt. Im Fall des Verhältnisses 2 sind sogar die Obertöne des höheren Tons eine echte Teilmenge von denen des tieferen. Es ist daher kaum ein Zufall, dass wir solchen Tönen sogar den gleichen Namen geben, unterschieden nur noch durch Indexnummern oder verschieden viele Strichlein.

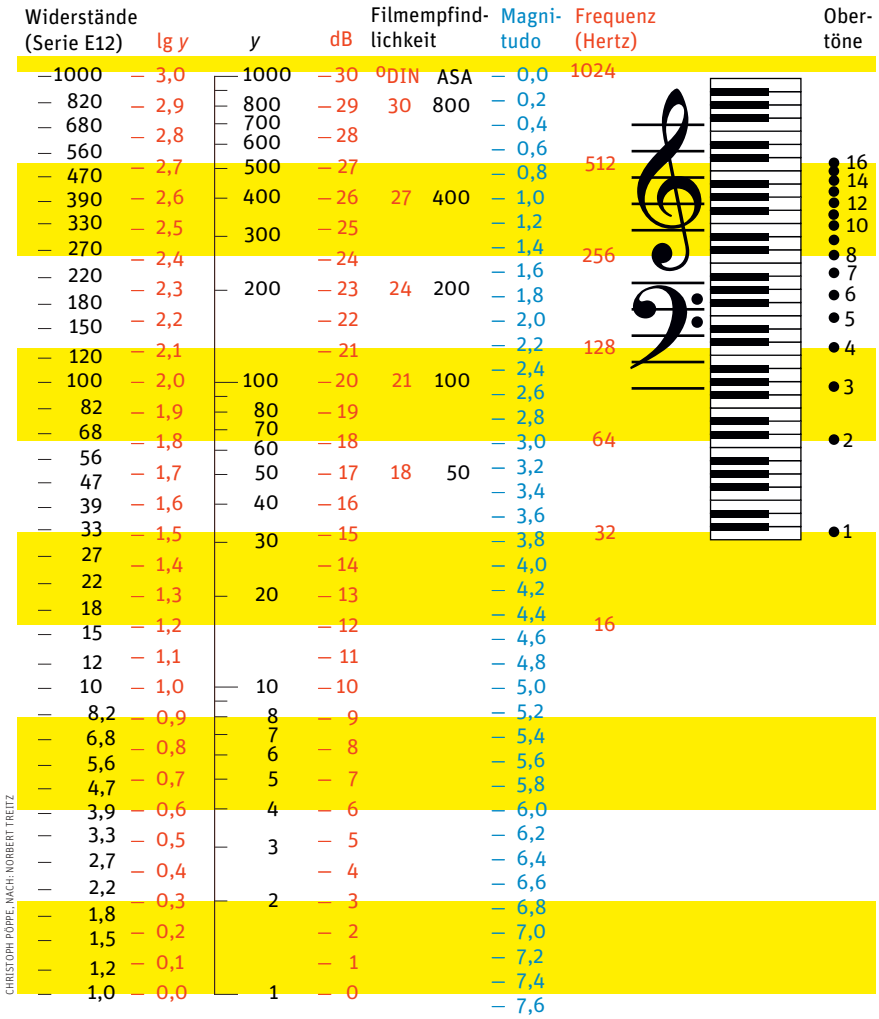
Die Tastatur eines Klaviers und die übliche Notenschrift sind eigentlich logarithmische Skalen, denn gleiche Abstände auf der Tastatur wie auf dem Notenpapier bedeuten nicht etwa gleiche Frequenzunterschiede, sondern gleiche Frequenzverhältnisse. Und das gilt auch nur ungefähr, weil aus historischen Gründen zwischen zwei weißen Tasten mal ein Halbton, mal ein Ganzton liegt; diese Inkonsequenz wird in der Notenschrift getreulich reproduziert. Zu allem Überfluss kommen keine reinen Terzen und keine reinen Quinten heraus, wenn man in der heute bei Tasteninstrumenten üblichen gleichstufigen Stimmung die Oktave in zwölf gleiche Halbtöne mit dem Frequenzverhältnis $2^{1/12}$ einteilt.

Die verschiedenen »wohltemperierten« Stimmungen des 18. Jahrhunderts sind wieder etwas anderes. Sie realisieren zwar auch »alle Tonarten« auf genießbare Weise, aber keineswegs mit lauter gleichen Intervallen. Allein Andreas Werckmeister (1645 – 1706) hat vier verschie-

es nicht darauf ankommt, ob man in Ellen (Noahs Skala, innen) oder in Handspannen (Japhets Skala, außen) misst. Im Gegensatz zu den Größen selbst gilt bei deren Logarithmen für die erste Ziffer hinter dem Komma die Gleichverteilung (mittlere Skala).



CHRISTOPH PÖPPE, NACH: NORBERT TREITZ



Verschiedene Skalen über drei Zehner- oder zehn Zweierpotenzen. Schwarze Ziffern geben die jeweiligen Größen im Klartext an, bunte in logarithmischen Pseudoeinheiten. Gelb-weiße Zebrastreifen zeigen Oktaven (Zweierpotenzen) an.

dene »wohltemperierte« Stimmungen vorgeschlagen, nicht aber die gleichstufige. Leider verwechseln fast alle Physik- und erschreckend viele Musiklehrbücher und Großlexika »wohltemperiert« und »gleichstufig«.

Erdbeben

Im April 1992 erzählten einige Kollegen bei uns in Duisburg, dass sie wegen eines Erdbebens fast aus dem Bett gefallen seien, während andere (darunter ich) durchgeschlafen und nichts bemerkt hatten. Es war seit Jahrhunderten das stärkste Erdbeben in Mitteleuropa, hatte sein Epizentrum in Roermond (Niederlande) und die Stärke 6 auf der der nach Charles Richter benannten Skala.

Ende 2004 kamen durch ein Seebeben mit Tsunami im Indischen Ozean über 230 000 Menschen um, wie wir noch in bedrückender Erinnerung haben. Seine Stärke war zirka 9. War es nur anderthalbmal so stark wie das bei uns?

Früher wurde bei Erdbebenmeldungen immer dazugesagt, dass die Richter-Skala »nach oben offen« sei, aber damit war nur gemeint, dass sie nicht ein endlicher Kriterienkatalog ist wie etwa die Mercalli-Skala oder auch die ursprüngliche Windstärkenskala von Beaufort, sondern dass ihre Zahlen aus Messungen hergeleitet werden.

Beim Erdbeben misst man die Amplituden gewisser Wellen an verschiedenen Orten und kann daraus abschätzen, welche Energie insgesamt freigesetzt worden ist. Bekanntlich geht die Leistung quadratisch mit der Amplitude, aber auch die Dauer ist bei stärkeren Beben länger, und es kommt empirisch heraus, dass zur 100-fachen Amplitude etwa die 1000-fache Gesamtenergie gehört. Geben wir nun die gemessenen Amplituden logarithmisch zur Basis 10 als »Richter-Magnitude« an, so bekommen wir für die geschätzte Energie eine Skala zur Basis $\sqrt{1000}$, also etwa 31,6.

Was bedeutet demnach der Unterschied zwischen 9 und 6, also 3 Magnituden? Rund den Faktor 30 000 für die Energie.

Haben wir Vergleichswerte für andere Vorgänge als Erdbeben? Seit es Kernwaffen gibt, vergleicht man ihre Sprengkraft mit Trinitrotoluol (TNT), einem kräftigen chemischen Sprengstoff, der 4,2 Megajoule pro Kilogramm freisetzt. Ein wenig Nachrechnen ergibt eine erstaunlich einfache Faustformel: Ein Kilogramm TNT kann ein Erdbeben der Magnitude 0 machen, ein Faktor 1000 addiert zwei Richter-Einheiten. Für die Nachahmung des Roermond-Bebens bräuchte man also eine Millarde Kilogramm TNT, das ist eine Megatonne. Das Seebeben 2004 war aber 30 000-mal so stark.

Auch wenn die Richter-Skala nach oben nicht begrenzt ist: Die Erdbeben sind es, und zwar gar nicht weit über dieser Stärke, etwa bei 9,5. Noch stärkere Verspannungen der Erdkruste lösen sich offenbar stets in kleineren Schritten.

Ist die Skala denn wenigstens nach unten begrenzt? Eine lineare Skala hört unten bei 0 auf, aber wir haben es ja mit einer logarithmischen zu tun. Ein kräftiger Faustschlag auf den Tisch mit einer Energie von 4 Joule löst immerhin ein Erdbeben der Stärke –4 aus.

Ganz harmloser Lärm?

Wenn Sie der Krach einer Baumaschine neben Ihrem Wohnzimmer stört, sind Sie sicher nicht von der Ankündigung erbaut, dass demnächst zehn solche Maschinen dort arbeiten werden. Der Akustiker beruhigt Sie: Es sind statt 80 Dezibel dann eben 90, also nur 10 Dezibel mehr. Sind das wirklich nur 12 Prozent? Der für Ihr Nervensystem zuständige Arzt findet das weniger beruhigend. Es stimmt zwar, dass man den Unterschied zwischen 50 und 60 Maschinen als etwa eben so deutlich wie den zwischen 5 und 6 wahrnimmt und nicht zehnmal so stark, aber die damit begründete Umrechnung von Energiestromdichten in logarithmische Einheiten ist doch ziemlich verwirrend. Vor allem wirkt sie im Sinn einer beachtlichen und durch nichts zu rechtfertigenden Verharmlosung.

Schall ist ein Transport von Energie, mit dem (hörbare) Strukturen mitlaufen. Eine dauernd tätige Schallquelle hat eine Sendeleistung (in Watt messbar) und erzeugt in verschiedenen Entfernungen

entsprechende Energiestromdichten (in Watt pro Quadratmeter).

Für Wellen in gewissen Frequenzbereichen sind unsere Ohren außerordentlich empfindlich. Bei 1000 Hertz sprechen sie bereits auf die Energiestromdichte der Größenordnung 1 Pikowatt (10^{-12} Watt) pro Quadratmeter (auf dem Trommelfell) an. Dabei ist die Amplitude des Wechseldrucks etwa 30 Mikropascal, sein Effektivwert rund 20 Mikropascal. Das ist der Druck, den eine Wasserschicht von wenigen Atomlagen Dicke in unserem Schwerefeld ausübt!

Leider geht es meistens wesentlich lauter zu. Richtig schmerzhaft wird es bei dreimillionenfachen Amplituden des Wechseldrucks, also der zehnbillionenfachen Energiestromdichte, das sind 13 Dezimalstellen mehr.

Nun kann man ganz einfach die Zahl der Dezimalstellen als (logarithmisches) Maß für die Intensität nehmen und als Pseudoeinheit das Bel einführen, benannt nach Alexander Graham Bell (1847–1922). Damit es nicht zu grob wird, wird die Zehnerpotenz noch in zehn Stufen geteilt, und man kommt zum Dezibel, einer »Einheit« zur Basis $10^{1/10} = 1{,}2589$.

Wie sich herausgestellt hat, ist nicht nur die Wahrnehmungsschwelle frequenzabhängig, sondern auch die schädigende Wirkung des Lärms. Man setzt daher vor das Messgerät ein Frequenzfilter, das den harmloseren Bereich entsprechend abschwächt gemäß einer Kurve A (oder B oder C). Die so »bewertete« Messung wird dann in dB(A) beziehungsweise dB(B) oder dB(C) angegeben.

Das alles scheint gut zum Weber-Fechner-Gesetz zu passen. Aber darüber hinaus gibt es zum Vergleich von gleich laut empfundenen Tönen verschiedener Frequenzen das Phon. Um auch noch zu formalisieren, welche Intensität man doppelt oder dreimal so laut empfindet wie eine andere, gibt es die Einheit Sone für die »Lautheit«, alles in sehr begrenzter Übereinstimmung mit Fechner.

Obwohl unsere Augen eine ebenso große Spannweite von Energiestromdichten bewältigen, kommt die Optik ganz gut ohne eine derartige Vielfalt von Größen und Einheiten aus. Lediglich in die Maßeinheiten Candela, Lumen und Lux ist eingearbeitet, dass die Empfindlichkeit des menschlichen Auges von der Frequenz des Lichts abhängt (ansonsten könnte man diese Größen in Watt beziehungsweise Watt pro Quadratmeter ausdrücken); aber logarithmische Maße werden in der Optik außerhalb der Astronomie nicht gebraucht.

Viele Geheimsprachen machen den Benutzern das Leben kaum leichter, halten aber die Laien durch jede Menge von Un- und Missverständnissen draußen, auch bei Dingen, die an sich ganz leicht wären. Im Hermann-Löns-Deutsch müssen die Kinder lernen, dass Lauf ein Rohr oder ein Bein sein kann, mit Schweiß aber Blut gemeint ist, jedoch keinesfalls umgekehrt, und halten das Ganze dann vielleicht für biologische Bildung. Der unnötige Gebrauch von Potenzgesetzen ist noch viel wirkungsvoller als so ein Vokabular.

Nicht in die Irre führen!

Damit will ich den Normenausschüssen keine böse Absicht unterstellen, wohl aber mangelnde Rücksicht auf Laien und Schüler auf dem Weg zum Experten. Ein Kollege sagte einmal nur halb im Scherz, er habe keine Lust mehr, Astronomie in der Schule zu machen, weil man so viel Zeit und Aufmerksamkeit für überflüssige Einheiten und altertümliche Bezeichnungen aufwenden müsse.

Wir brauchen mehr und nicht weniger naturwissenschaftlich-technische Bildung bei Laien (Juristen, Politikern, …), und die Natur ist schwierig genug. Wir sollten dem Verständnis nicht auch noch vermeidbare Hürden in den Weg legen. Die Aussage »Die eine Lärmquelle ist so laut wie zehn von der anderen Sorte zusammen« ist einfacher zu verstehen als »Die eine ist 10 dB lauter«. Und die Aussage, das harmlose Erdbeben von Roermond habe die Stärke 6 und das 30 000-mal so starke katastrophale vom Indischen Ozean auch nur 9, ist mit »irreführend« noch sehr vornehm charakterisiert.

Hoffen wir, dass nicht demnächst die Staatsverschuldung in Dezibel angegeben wird oder auf einer anderen nach oben offenen logarithmischen Skala, für die dann die Opposition den Namenspatron auswählen darf. ◁

Norbert Treitz ist apl. Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen. Seine Vorliebe für erstaunliche Versuche und Basteleien sowie für anschauliche Erklärungen dazu nutzt er auch zur Förderung hoch begabter Kinder und Jugendlicher.

Das Netzwerk für die Generation der Junggebliebenen

Knüpfen Sie Kontakte zu Menschen Ihrer Wellenlänge.

Tauschen Sie Wissen, Erfahrungen und Meinungen.

Einfach und kostenlos im Online-Netzwerk für Junggebliebene.

Jetzt mitmachen!

www.platinnetz.de

Platinnetz
Verbindungen leben.

DAS UNTERSCHÄTZTE SONNENVITAMIN

Neueste Forschungsergebnisse zeigen, dass Vitamin D viel mehr kann als nur die Knochen stärken – und dass viele von uns zu wenig davon im Blut haben. Ist Vitamin-D-Mangel mit schuld an schweren Krankheiten wie Krebs, Diabetes und Muskelschwund?

Von John H. White
und Luz R. Tavera-Mendoza

In Kürze

- **Vitamin D** war lange Zeit nur für seine Rolle beim Knochenwachstum bekannt. Es hat jedoch zahlreiche Funktionen überall im menschlichen Körper. So nimmt es **großen Einfluss auf die Immunreaktion** und eine Reihe von Zellschutzmechanismen.
- Vitamin D kann aus der Nahrung aufgenommen oder bei **Kontakt mit Sonnenlicht** in der menschlichen Haut gebildet werden. Messungen ergaben jedoch, dass viele Menschen zu wenig davon im Blut haben.
- Es gibt klare Hinweise auf einen **Zusammenhang zwischen Vitamin-D-Mangel und Krebs** sowie Autoimmun- und Infektionskrankheiten. Deshalb sollte die derzeit empfohlene Tagesdosis erhöht werden.

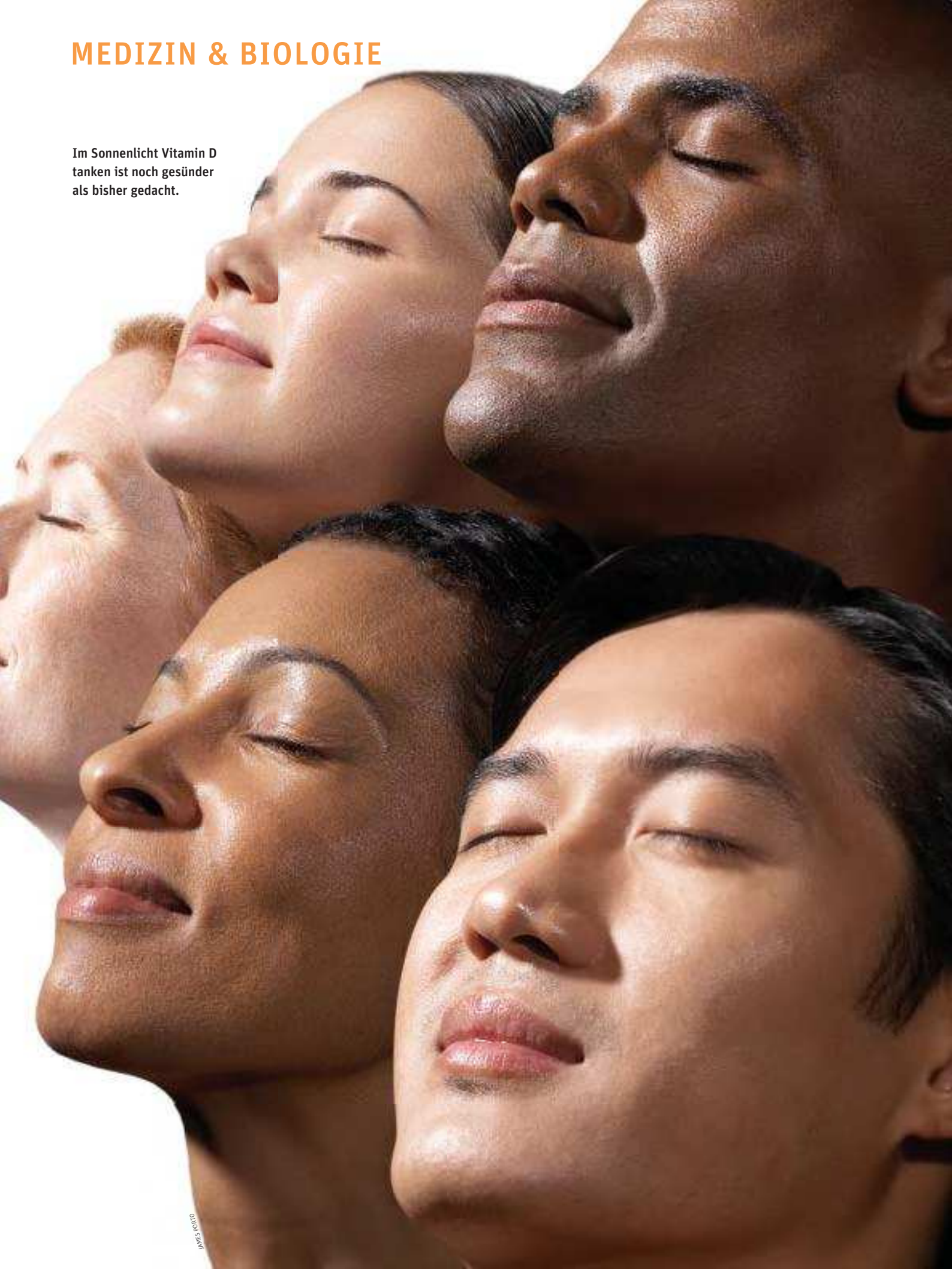
Man nannte es Sonnenkur. Bis zur Entdeckung der Antibiotika vor 80 Jahren war sie neben dem Aufenthalt in großer Höhe die einzige bekannte wirksame Therapie gegen Tuberkulose. Niemand wusste, warum sie funktionierte. Fest stand nur, dass viele Schwindsüchtige gesund wurden, wenn sie eine Kur an einem sonnigen Ort machten. Dieselbe Behandlung war schon 1822 für eine andere Geißel der damaligen Zeit entdeckt worden: Rachitis. Sie führt bei Kleinkindern zu Verkrüppelungen, weil die Knochen weich und verformbar bleiben.

Die Rachitis hatte im 18. und 19. Jahrhundert in Europa stark zugenommen, als im Zuge der Industrialisierung immer mehr Menschen in Großstädte mit hoher Luftverschmutzung zogen. Ein Warschauer Arzt bemerkte damals, dass Kinder auf dem Land vergleichsweise selten betroffen waren. Wie er bei Versuchen mit Stadtkindern feststellte, ließ sich Rachitis oft allein mit Sonnenlicht heilen.

Im Jahr 1824 entdeckten deutsche Wissenschaftler auch ein Nahrungsmittel, das hervorragend gegen die Krankheit wirkte: Lebertran. Doch sollte noch fast ein Jahrhundert vergehen, bis die Verbindung zwischen dem heilsamen Effekt des Sonnenlichts und des Fischöls klar wurde. Entscheidend dafür waren Versuche an Ratten mit künstlich erzeugter Rachitis. Wie sich herausstellte, wirkte das Verfüttern von Haut sonnenbestrahlter Tiere genauso gut gegen die Krankheit wie die Gabe von Lebertran. Der entscheidende Faktor, der beiden gemeinsam ist, wurde 1922 identifiziert und auf den Namen Vitamin D getauft.

Damals war die Idee der »lebenswichtigen Amine« oder »Vitamine« gerade frisch aufgekommen und äußerst populär. Die weitere Erforschung der Aufgaben von Vitamin D im Organismus stand daher ganz im Zeichen seiner Zugehörigkeit zur Gruppe der essenziellen Mikronährstoffe, die der Körper nicht als Energielieferanten, sondern für Spezialfunktionen in kleinen Mengen braucht, aber nicht selbst herstellen kann. Wegen des Zusammenhangs mit Rachitis ging es dabei im nächsten halben Jahrhundert überwiegend um die Rolle des Moleküls bei der Knochenbildung. Insbesondere wurde untersucht, wie Vitamin D in den Nieren, im Verdauungstrakt und im Skelett dazu beiträgt, den Kalziumaustausch zwischen Knochen und Blutkreislauf zu regulieren.

Erst in den letzten 25 Jahren hat sich die Forschung auch anderen Aspekten zugewandt. Dabei wurde deutlich, dass das »Sonnenvitamin« noch viel mehr kann als bis dahin gedacht. Mittlerweile ist nachgewiesen, dass es Krebs verhütend wirkt und ein wichtiger Regulator des Immunsystems ist. Allerdings kommen viele seiner neu entdeckten Fähigkeiten nur dann voll zum Tragen, wenn es in Konzentrationen im Blut vorliegt, die bei unserer modernen Lebensweise nur selten zu erreichen sind. Umgekehrt bringen epidemiologische Daten einen niedrigen Vitamin-



Im Sonnenlicht Vitamin D tanken ist noch gesünder als bisher gedacht.

JAMES PORTO

D-Spiegel mit diversen Leiden in Verbindung. Demnach trägt eine Unterversorgung mit dem Mikronährstoff möglicherweise die Mitschuld an einer Reihe schwerer Erkrankungen.

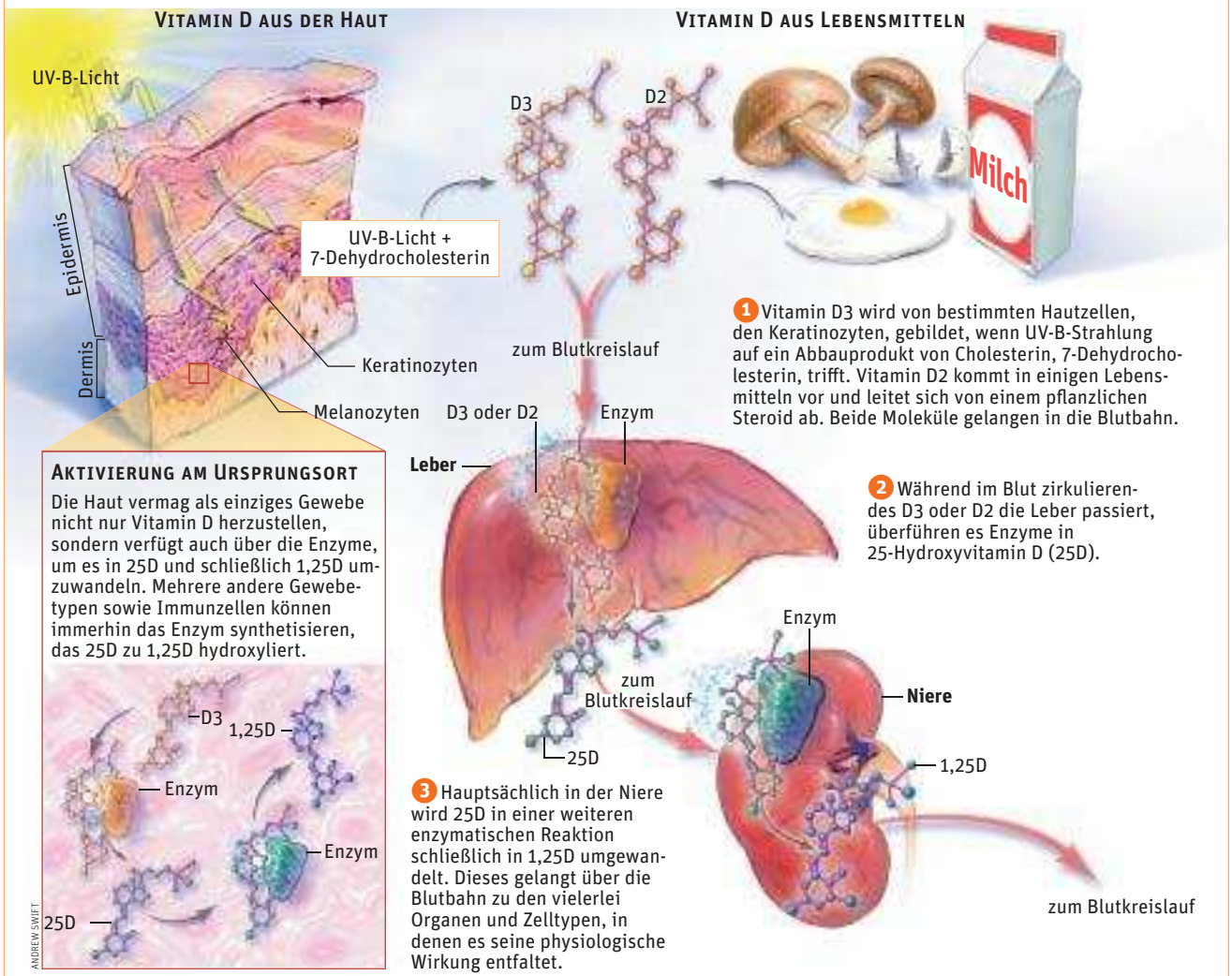
Vielseitiger Schalter

Wir Menschen können Vitamin D nur aus einigen wenigen Lebensmitteln beziehen – wie fettem Fisch oder Waltran – sowie inzwischen aus Nahrungsergänzungsmitteln. Unser Körper vermag es allerdings auch selbst herzustellen: durch eine chemische Reaktion, die in der Haut abläuft, wenn sie ultravioletter Strahlung im UV-B-Bereich (bei einer Wellenlänge zwischen 315 und 280 Nanometern) ausgesetzt ist. Genau genommen handelt es sich also gar nicht um ein Vitamin, denn bei genügend Kontakt mit Sonnenlicht brauchen wir es nicht mit der Nahrung aufzunehmen. Doch in gemäßigten Breiten reicht die einfallende ultraviolette Strahlung bis zu sechs Monate im Jahr nicht für eine ausreichende Vitamin-D-Synthese aus, und in diesem Fall sind andere Quellen entscheidend.

Unter dem Begriff »Vitamin D« fasst man gewöhnlich zwei sehr ähnliche Moleküle zusammen. Vitamin D3 oder Cholecalciferol entsteht aus einem Abbauprodukt von Cholesterin, dem 7-Dehydrocholesterin. Bestimmte Hautzellen, so genannte Keratinozyten, erzeugen es bei Kontakt mit UV-B-Strahlung. Vitamin D2 oder Ergocalciferol leitet sich von einem cholesterinähnlichen pflanzlichen Steroid ab und findet sich in bestimmten Pilzen oder im Eigelb.

Vom Rohstoff zum aktiven Vitamin

Die Bezeichnung Vitamin D bezieht sich auf zwei sehr ähnliche Moleküle: Cholecalciferol (D3), das durch Ultraviolettstrahlung in der menschlichen Haut erzeugt wird, und Ergocalciferol (D2), das in bestimmten Nahrungsmitteln vorkommt. Beide gehen erst in einer zweistufigen enzymatischen Umwandlung in die biologisch aktive Form des Vitamins über: 1,25D.



Keines der beiden Moleküle hat als solches schon eine Funktion im menschlichen Stoffwechsel. Jedes muss erst noch chemisch modifiziert werden. Dabei hängt ein Enzym zunächst eine Hydroxylgruppe (OH) an, so dass 25-Hydroxyvitamin D oder kurz 25D entsteht. Verschiedene Zelltypen in der Haut können diese Umwandlung durchführen. Hauptsächlich aber findet sie in der Leber statt.

Das so gebildete 25D zirkuliert im Blutkreislauf, ist aber auch noch nicht biologisch aktiv. Es muss ein weiteres Mal hydroxyliert werden – zu 1,25-Dihydroxyvitamin D oder 1,25D. Das für diese Aufgabe zuständige Enzym, die 1-Alpha-Hydroxylase, wurde zuerst in der Niere nachgewiesen. Tatsächlich entsteht dort ein Großteil des freien 1,25D im Organismus.

Auch in diesem Fall hat sich mittlerweile jedoch herausgestellt, dass viele andere Gewebe das Enzym ebenfalls besitzen und daher selbst zur Umwandlung von 25D fähig sind. Zu ihnen zählt neben Zellen des Immunsystems vor allem die Haut. Diese kann also als einziges Organ biologisch aktives 1,25D mit Hilfe von UV-Licht komplett von Anfang bis Ende herstellen.

Wie wichtig es ist, dass verschiedene Zellen im Körper aus zirkulierendem 25D lokal bioaktives Vitamin D produzieren, wurde erst in jüngster Zeit erkannt, als sich das breite Wirkungsspektrum der Substanz abzeichnete. So kann das 1,25D-Molekül fast in jedem Gewebe des menschlichen Körpers Gene anschalten. Dazu bindet es sich an den Vitamin-D-Rezeptor (VDR), der im Zellkern als so genannter Transkriptionsfaktor fungiert. Nach dem Andocken von 1,25D bildet er mit einem weiteren Protein namens Retinoid-X-Rezeptor (RXR) einen Komplex. Dieser lagert sich an eine Regulatorregion des Ziel-Gens an, die sich in dessen Nähe befindet. Das veranlasst die zuständige Zellmaschinerie (die RNA-Polymerase), Abschriften von dem betreffenden Gen (Boten-RNAs) anzufertigen, die zu den zelleigenen Eiweißfabriken (Ribosomen) wandern, wo sie in ein Protein übersetzt werden (siehe Kasten auf S. 44).

Indem 1,25D eine Zelle zur Produktion eines bestimmten Eiweißstoffs veranlasst, verändert es ihre Eigenschaften. Auf dieser Fähigkeit, Gene in verschiedenen Zelltypen zu aktivieren, beruht die weit reichende physiologische Wirksamkeit von Vitamin D. Da es hauptsächlich in einem einzigen Organ gebildet wird und bei seiner Rundreise durch den Körper dann viele weitere Gewebe beeinflusst, wirkt es quasi als Hormon. Tatsächlich ist Vitamin D ein Steroid, und der entsprechende Rezeptor gehört zur Familie der nukleären Rezeptoren, die auf hochwirksame Hormone aus der Gruppe der Steroide wie Östrogen oder Testosteron ansprechen.

Vermutlich reguliert 1,25D mehr als tausend verschiedene Gene. Mehrere davon sind am Kalziumstoffwechsel beteiligt, was die Rolle von Vitamin D beim Knochenwachstum erklärt. In den letzten 20 Jahren haben Wissenschaftler jedoch zahlreiche weitere Gene identifiziert, die von 1,25D beeinflusst werden, darunter einige mit entscheidender Funktion bei einer Vielzahl zellulärer Abwehrmechanismen.

Bollwerk der Abwehr

Seit den 1980er Jahren häufen sich die Indizien dafür, dass Vitamin D gegen Krebs schützt. So zeigte sich bei etlichen epidemiologischen Studien ein starker reziproker Zusammenhang zwischen Sonnenlichtexposition und Häufigkeit bestimmter Krebsarten, die nicht die Haut betreffen: Je intensiver die Sonneneinstrahlung, desto seltener trat der Tumor auf. Untersuchungen an Tieren und Zellkulturen bestätigten das und halfen, die zu Grunde liegenden Mechanismen aufzuklären.

Bei Mäusen mit Krebs im Kopf- und Halsbereich zum Beispiel verlangsamte die Substanz EB1089, ein chemisches Analogon von 1,25D, das Tumorwachstum um 80 Prozent. Ähnliche Ergebnisse ließen sich bei Tiermodellen für Brust- und Prostatakrebs erzielen. Der Grund dafür zeigte sich, als Forscher die Gene identifizierten, die von dieser synthetischen Variante von Vitamin D angeschaltet werden. Unkontrolliertes Wuchern ist ein klassisches Kennzeichen von Tumorgewebe, und EB1089 unterdrückt, wie sich zeigte, die Fähigkeit einer Zelle zur Teilung, indem es die Aktivität etlicher Gene erhöht. Eines davon – GADD45α – ist schon lange bekannt. Es hindert Zellen mit beschädigter DNA an der Vermehrung und senkt so das Risiko, dass sie zu einem Tumor heranwachsen. Außerdem aktiviert EB1089 Gene, die Krebszellen zur Differenzierung anregen. Diese gehen dadurch in einen ausgereiften, spezialisierten Zustand über, in dem sie sich nur mehr eingeschränkt vermehren können.

Noch ein weiteres Dutzend Gene, die mit dem Energiehaushalt und der Selbstentgiftung der Zelle zu tun haben, scheint mitverantwortlich für den Antitumoreffekt von EB1089 zu sein. Dieser Wirkstoff, der sich erst im Versuchsstadium befindet, wurde vom chemischen Aufbau so maßgeschneidert, dass

VITAMIN-D-QUELLEN

Vitamin D3 und D2 kommen in einigen Lebensmitteln vor. Außerdem werden manche Produkte damit angereichert. Durch Lebensmittel erhält der Mensch relativ kleine Dosen von Vitamin D im Vergleich zu den Mengen, die in der Haut bei Kontakt mit UV-B-Licht hergestellt werden. (IE = Internationale Einheiten)

Lebertran (1 Esslöffel)
1360 IE D3

gekochter Tunfisch, Sardinen, Makrele oder Lachs (100 g)
300 – 360 IE D3

Pasaniapilze (Shiitake)
(frisch, 100 g)
100 IE D2
(getrocknet, 100 g)
1600 IE D2

ALLE: JAMES PORTO

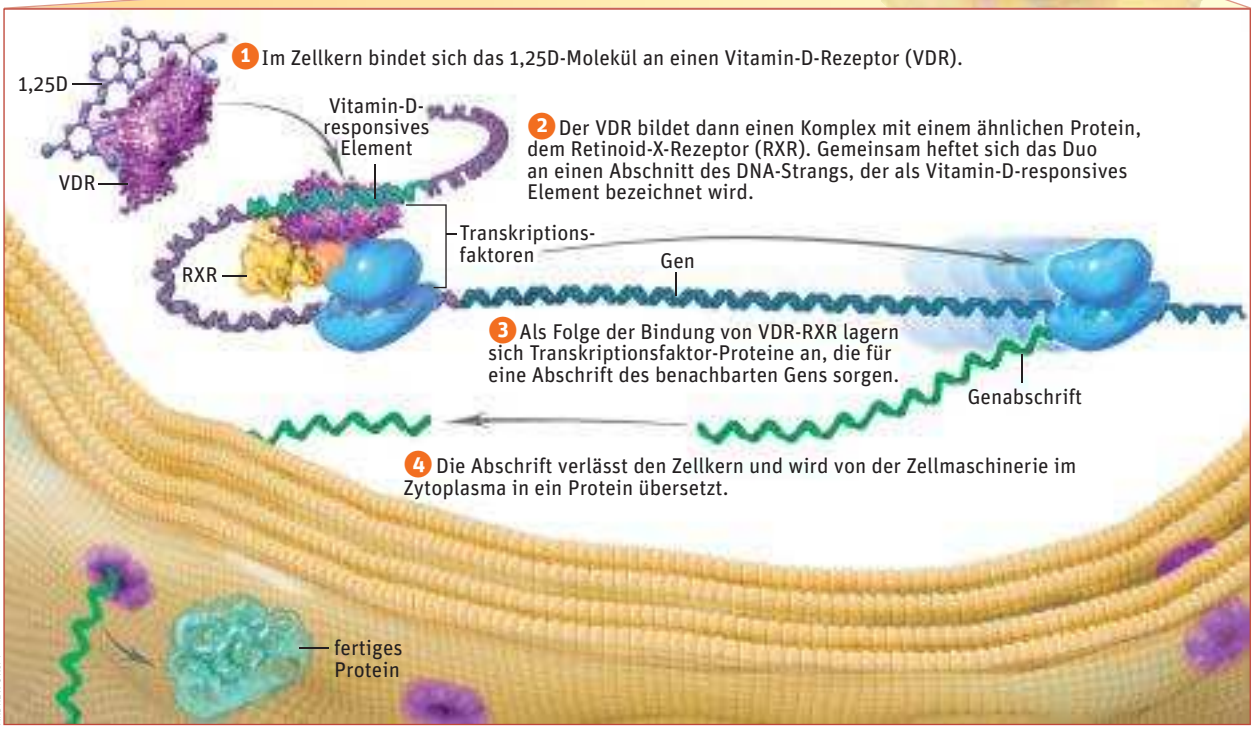
Eigelb
20 IE D3/D2

angereicherte Milchprodukte, Orangensaft oder Haferflocken (eine Portion)
100 – 400 IE D3/D2

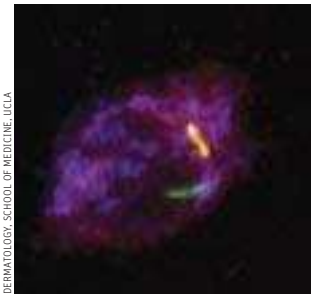
Ganzkörpersonnenbad
(15 – 20 Minuten am Mittag im Sommer, helle Haut)
100 000 IE D3

Ein vielseitiger Genschalter

Die biologisch aktive Form von Vitamin D – 1,25D – »knipst« bestimmte Gene an, so dass die darin kodierten Proteine hergestellt werden. Diese können lokal begrenzte oder auch weiter reichende physiologische Wirkungen haben. Vermutlich reguliert 1,25D mehr als tausend verschiedene Gene in mindestens einem Dutzend Geweben und Zelltypen überall im Körper.



ANDREW SWIFT



PHILIP T. LIU, MARIA T. OCHOA UND ROBERT L. MODLIN, DERMATOLOGY, SCHOOL OF MEDICINE, UCLA

Eine mit 1,25D behandelte Immunzelle reagiert auf die Infektion mit Tuberkelbazillen (grün und gelb) mit der Produktion von antimikrobiellem Kathelizidin (rot).

er wie 1,25D wirkt, aber nicht dazu führt, dass sich Kalzium in der Blutbahn oder in Geweben in schädlichen Konzentrationen anhäuft. Er ist eines von mehreren potenziellen Krebsmedikamenten, welche die Pharmaindustrie derzeit entwickelt, um die starke Antitumorwirkung von Vitamin D nutzbar zu machen.

Unsere eigene Arbeitsgruppe an der McGill University in Montreal (Kanada) hat ebenfalls die Krebs hemmende Wirkung von Vitamin D untersucht. Dabei stießen wir 2004 allerdings unverhofft auf Anzeichen dafür, dass 1,25D auch hinter einer völlig anderen Form der Körperabwehr steckt. Viele von ihm regulierte Gene wurden in den letzten Jahren entdeckt, indem Wissenschaftler das menschliche Erbgut gezielt nach Regulatorsequenzen absuchten, an die sich der VDR-RXR-Proteinkomplex bindet. In einem gemeinsamen Projekt mit Sylvie Mader von der Université de Montréal nutzten wir ein Computerprogramm, um solche Vitamin-D-responsiven Elemente (VDREs) aufzuspüren und die Gene in ihrer Nähe zu ermitteln.

Wie erhofft, gelang es uns auf diese Weise, einige der Antikrebseffekte von Vitamin D besser zu verstehen. Außerdem aber fanden wir VDREs in der Nähe von zwei Genen für antimikrobielle Peptide namens Kathelizidin und Beta-Defensin 2: kleine Proteine, welche als natürliche Antibiotika gegen ein breites Spektrum von Bakterien, Viren und Pilzen wirken. Als wir daraufhin 1,25D zu menschlichen Zellen in einer Kulturschale gaben, erzeugten diese tatsächlich mehr Beta-Defensin 2 – allerdings nur in Maßen. Bei gewissen Zelltypen – darunter Immunzellen und Keratinozyten – nahm die Kathelizidin-Produktion dagegen dramatisch zu (Foto links). Entsprechend töteten mit 1,25D behandelte Abwehrzellen pathogene Bakterien, mit denen wir sie zusammenbrachten, sofort ab.

In Fortführung unserer Versuche konnten die Arbeitsgruppen von Philip Liu und Robert Modlin an der University of California in Los Angeles zeigen, dass menschliche Abwehrzellen bei Kontakt mit den Zellwänden von Bakterien nicht nur Vitamin-D-Rezeptoren herstellen, sondern auch das Enzym produzie-

ren, das im Blut zirkulierendes 25D in biologisch aktives 1,25D umwandelt. Dadurch wurden die Immunwächter stimuliert, Kathelizidin zu produzieren und eine antimikrobielle Aktivität gegen eine Vielzahl von Bakterien zu entwickeln – darunter interessanterweise auch *Mycobacterium tuberculosis*. Damit gab es endlich eine plausible Erklärung für die mysteriöse Wirksamkeit der Sonnenkur gegen Tuberkulose: Sie löste einen Vitamin-D-Schub aus, der die Immunzellen zur Synthese eines natürlichen Antibiotikums anregte, das die TB-Erreger zurückschlug.

Während sich die Wissenslücken über die physiologische Rolle von Vitamin D schließen, wird immer deutlicher, dass sich einige seiner Schutzfunktionen aus Mechanismen entwickelt haben, deren Ursprung dort liegt, wo das Molekül entsteht: in der Haut. Unter diesem Aspekt erscheint auch die wachstumshemmende Wirkung von 1,25D auf Krebszellen einleuchtend; denn UV-B-Strahlung schädigt das Erbgut von Hautzellen, so dass sie entarten können.

Auch die antimikrobielle Wirkung von Vitamin D ist vielleicht eine Anpassungsreaktion: ein Ausgleich dafür, dass das Vitamin einige andere Immunreaktionen unterdrückt – besonders solche, die überschießende Entzündungsprozesse hervorrufen. Wie viele von uns aus leidvoller Erfahrung wissen, verursacht die übermäßige Einwirkung von UV-Strahlen Sonnenbrand, wobei sich durch die entzündungsbedingte Erweiterung der Blutgefäße die Haut rötet. Während eine Entzündung im Normalfall die Wundheilung fördert und dem Immunsystem hilft, Infektionen abzuwehren, wirkt sie, wenn sie aus dem Ruder läuft, ihrerseits schädlich.

Insofern verwundert es kaum, dass 1,25D, wie eine eindrucksvolle Liste wissenschaftlicher Veröffentlichungen belegt, auch entzündungshemmend wirkt, indem es in die Kommunikation innerhalb des Immunsystems eingreift. So scheiden bestimmte Abwehrzellen so genannte Zytokine aus, um andere Komponenten der Körperpolizei zu alarmieren. Wie sich herausstellte, unterdrückt Vitamin D eine übertriebene Entzündungsreaktion, indem es diesen »Polizeifunk« unterbricht.

Den ersten direkten Beweis dafür lieferten Tierexperimente in den frühen 1990er Jahren. Dabei waren mit 1,25D behandelte Mäuse vor der Entzündungsreaktion geschützt, die normalerweise nach Verletzungen oder der Behandlung mit dem chemischen Reizstoff Dinitrobenzol auftritt. Tiere mit Vitamin-D-Mangel reagierten dagegen überempfindlich. Dieses Ergebnis eröffnete neue Ansätze für die Behandlung von Autoimmunkrankheiten wie Typ-1-Diabetes, multipler Sklerose (MS) und Morbus Crohn, bei denen ein Überschuss an Zytokinen als Ursache vermutet wird.

Inzwischen hat sich auch gezeigt, dass viele Zelltypen einschließlich der Immunzellen nicht nur freies 1,25D verwerten, sondern auch in der Blutbahn zirkulierendes 25D in die aktive Form überführen können. Demnach ist die entzündungshemmende Wirkung von 1,25D weder auf die Hautzellen beschränkt noch ein Phänomen, das nur bei Sonnenbrand auftritt.

Ein Mangel von epidemischen Ausmaßen?

Die Einsicht in den vielfältigen Aufgabenbereich von 1,25D macht auch eine Fülle epidemiologischer Befunde verständlich, wonach ein Zusammenhang zwischen geringem Vitamin-D-Spiegel und bestimmten Erkrankungen besteht – darunter Krebs sowie Autoimmun- und sogar Infektionskrankheiten wie Grippe. Die Zunahme von Erkältungen im Winter könnte folglich eher mit einem Mangel an Vitamin D als mit den tiefen Temperaturen zu tun haben.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist eine weitere Erkenntnis: Die positiven physiologischen Reaktionen auf 25D, gleich ob sie im Labor oder in klinischen Studien beobachtet wurden, kommen großenteils nur dann voll zur Geltung, wenn die Konzentration des Stoffs im Blut höher liegt als der Durchschnittswert in vielen Bevölkerungsgruppen. Nach Meinung der meisten Forscher auf dem Gebiet weist eine beträchtliche Anzahl von Menschen in den gemäßigten Breiten vor

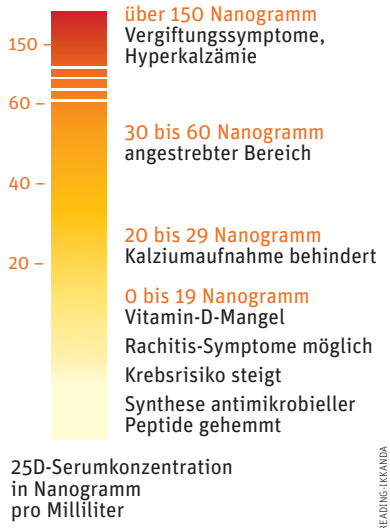
FOLGEN VON VITAMIN-D-MANGEL

Die Hinweise mehren sich, dass ein chronisch zu niedriger Vitamin-D-Spiegel das Risiko für etliche weit verbreitete Krankheiten erhöht. Hier einige Beispiele:

- ein um 30 bis 50 Prozent höheres Risiko für **Brust-, Prostata- und Darmkrebs** bei D25-Serumkonzentrationen unter 20 Nanogramm pro Milliliter,
- ein fünffach erhöhtes Risiko für **Eierstockkrebs** bei Frauen, die in hohen geografischen Breiten (etwa in Norwegen und Island) leben, im Vergleich zu solchen in den Tropen,
- ein um 77 Prozent niedrigeres **Risiko für alle Krebsarten** bei über 55 Jahre alten Frauen in Nebraska, die jeden Tag 1100 IE D3 einnahmen,
- ein um 62 Prozent niedrigeres Risiko für **multiple Sklerose** bei 25D-Serumspiegeln über 40 im Vergleich zu unter 25 Nanogramm pro Liter,
- ein um 80 Prozent niedrigeres Risiko, irgendwann im Leben an autoimmunem Diabetes Typ 1 zu erkranken, bei finnischen Kindern, die im ersten Lebensjahr täglich 2000 IE D3 erhielten.

WIE VIEL 25D IST OPTIMAL?

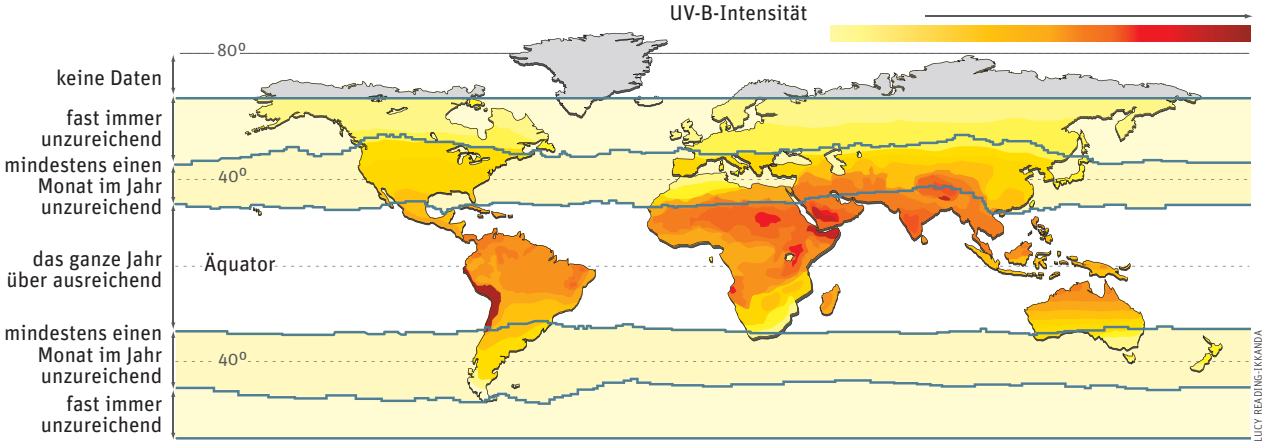
Messungen der 25D-Konzentration im Blutserum zeigen, wie viel Vitamin D dem Körper zur Verfügung steht. Dabei gelten Werte zwischen 30 und 45 Nanogramm pro Milliliter als gerade ausreichend für gesunde Knochen. Einige positive Zellreaktionen auf Vitamin D erfordern allerdings höhere Konzentrationen. Bei weniger als 30 Nanogramm pro Milliliter ist die Gesundheit bedroht, bei über 150 Nanogramm pro Milliliter kann es zu schädlichen Kalziumeinlagerungen in Herz, Arterien, Lungenbläschen und Nieren kommen. Vergiftungssymptome sind Schwäche, Müdigkeit, Erbrechen, Durchfall und Kopfschmerzen.



LUCY READING-IKKANDA

Vitamin D im Winter

UV-B-Strahlung aus dem Sonnenlicht ist für die meisten Menschen die einzige nennenswerte Quelle für Vitamin D. Je nach Ort und Jahreszeit kommt es folglich zu einer Unterversorgung. Da Ozon die UV-B-Strahlung abfängt, ist sie am Äquator, wo das Sonnenlicht die kleinste Strecke durch die Atmosphäre zurücklegt, am intensivsten. Dort funktioniert die Vitamin-D-Synthese deshalb das ganze Jahr hindurch. Auf hohen geografischen Breiten ist die UV-B-Intensität wegen des schrägen Einfallswinkels der Sonnenstrahlen in der dunklen Jahreszeit dagegen zu gering, um die Vitamin-D-Synthese in der Haut in Gang zu setzen.



allem im Winter einen Vitamin-D-Spiegel weit unter dem gesundheitlich optimalen Niveau auf. Der Grund ist, dass außerhalb der Tropen nur im Sommer größere Mengen UV-B-Strahlung einfallen.

Im Einklang damit besteht eine deutliche Korrelation zwischen zunehmender geografischer Breite und dem Risiko für gewisse Erkrankungen. Am auffälligsten ist der Zusammenhang mit multipler Sklerose (MS): einer schubweise fortschreitenden Muskeldegeneration, bei der Immunzellen die schützende Myelinhülle um die Nervenfasern des zentralen Nervensystems angreifen. In den Regionen Nordamerikas, Europas und Australiens, die am weitesten vom Äquator entfernt sind, tritt die Erkrankung signifikant häufiger auf. Schuld daran ist, wie Untersuchungsergebnisse überzeugend belegen, die verminderte UV-B-Exposition.

Heilsame UV-B-Strahlung

Der Krankheitsverlauf und die Symptomschübe bei MS-Patienten zeigen außerdem regelmäßige jahreszeitliche Schwankungen – mit einem Maximum im Frühjahr, wenn der Blutspiegel von 25D nach dem Winter am niedrigsten ist, und einem Minimum im Herbst, wenn die hoch stehende Sonne im Sommer den Vorrat an Vitamin D3 kräftig aufgestockt hat.

Für eine wichtige Rolle der UV-B-Strahlung sprechen auch Untersuchungen an 79 eineiigen Zwillingspaaren durch Wissenschaftler von der University of California in San Diego. Dabei ergab sich ein inverser Zusammenhang zwischen einer gesteigerten Sonnenexposition im Alter von 6 bis 16 Jahren und dem Risiko, irgendwann im Leben an multipler Sklerose zu erkranken: Bei Kindern, die deutlich mehr Zeit im Freien verbracht hatten als ihr jeweiliger Zwilling, lag die Erkrankungshäufigkeit um bis zu 57 Prozent niedriger.

Ähnliche Befunde gibt es für Diabetes vom autoimmunen Typ 1 und für Morbus Crohn, eine entzündliche Autoimmunerkrankung des Darms, aber auch für verschiedene Typen bösartiger Tumore. So verdoppelt sich die Häufigkeit von Krebserkrankungen der Blase, der Brust, der Eierstöcke und des Dick- sowie Mastdarms in den USA von Süd nach Nord.

Aktuelle Untersuchungen belegen auch einen Zusammenhang zwischen dem Krankheitsrisiko und der Konzentration an freiem 25D im Blut. Forscher der Harvard School of Public Health in Boston (Massachusetts) analysierten die aufbewahrten Blutproben von etwa sieben Millionen Rekruten der US-Streitkräfte und ermittelten anhand der Krankenakten, welche Personen zwischen 1992 und 2004 an multipler Sklerose erkrankt waren. Wie sich herausstellte, trat bei Soldaten, deren 25D-Serumkonzentration zum Zeitpunkt der Probennahme unter 25 Nanogramm pro Milliliter gelegen hatte, der Muskelschwund um 62 Prozent häufiger auf als bei denen mit einem Wert über 40 Nanogramm pro Milliliter.

HIER WIRKT VITAMIN D

Der Vitamin-D-Rezeptor kommt in vielen Geweben und in zirkulierenden Immunzellen vor. Dies deutet darauf hin, dass dort aktives Vitamin D (die doppelt hydroxylierte Form 1,25 D) an der Regulation der Genaktivität beteiligt ist. In der folgenden Liste sind einige der Gewebe- und Zellarten aufgeführt, in denen eine Wirkung von 1,25D nachgewiesen wurde:

- Bauchspeicheldrüse
- Brust
- Fettgewebe
- Gehirn
- Immunzellen
- Keratinozyten der Haut
- Knochen
- Leber
- Nebenschilddrüse
- Nerven
- Nieren
- Prostata
- Verdauungstrakt

Nach anerkannten Gesundheitsstandards, die in erster Linie auf den Erfordernissen für die Knochenbildung beruhen, sind 25D-Konzentrationen zwischen 30 und 45 Nanogramm pro Milliliter im Blut gerade noch ausreichend. Werte unter 21 bis 29 Nanogramm pro Milliliter gehen oft mit einer verringerten Knochendichte einher. Bei weniger als 20 Nanogramm pro Milliliter können Rachitis-Symptome auftreten, und das Risiko für Dickdarmkrebs ist erhöht.

Derart niedrige Konzentrationen sind leider weit verbreitet, besonders im Winter. Das illustriert etwa eine Untersuchung von 420 gesunden Frauen aus Kopenhagen (55 Grad nördliche Breite), Helsinki (60 Grad), Cork (52 Grad) und Warschau (52 Grad) im Februar und März 2005. Bei 92 Prozent der jungen Mädchen in dieser Stichprobe lag der 25D-Spiegel unter 20 und bei 37 Prozent sogar unter 10 Nanogramm pro Milliliter. Die entsprechenden Werte für die älteren Frauen betrugen 37 und 17 Prozent.

Einmal täglich sonnenbaden

Außer der geografischen Breite spielen weitere Faktoren eine Rolle, vor allem die Hautfarbe. Helle Haut synthetisiert im Sonnenlicht sechsmal so viel Vitamin D wie dunkle, die mit ihrem hohen Gehalt an Melanin die UV-Strahlung abblockt (Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 38). Deshalb haben Afroamerikaner für gewöhnlich nur etwa halb so hohe 25D-Spiegel wie Weiße. Bei den Teilnehmern einer großen, repräsentativen Gesundheits- und Ernährungsstudie in den USA wiesen 42 Prozent der untersuchten dunkelhäutigen Frauen mit 25D-Serumkonzentrationen unter 15 Nanogramm pro Milliliter sogar einen schweren Vitamin-D-Mangel auf.

In diesem Zusammenhang ist auch das gestiegene öffentliche Bewusstsein um die Risiken des Sonnenbadens problematisch. Moderne Sonnenschutzmittel verringern das in der Haut produzierte Vitamin D um mehr als 98 Prozent. Um den normalen Bedarf an dem Mikronährstoff zu decken, sollten Menschen mit heller oder bronzener Hautfarbe in Nordamerika oder Europa im Sommer täglich ein ungeschütztes Sonnenbad von 5 bis 15 Minuten zwischen 10.00 und 15.00 Uhr nehmen. Dabei kommt es höchstens zu einer leichten Rosafärbung der Haut.

Auch mit Vitamin-D-Präparaten kann man natürlich einem Mangel vorbeugen. Die Höhe der Tagesdosis ist jedoch umstritten. Die American Academy of Pediatrics (AAP) empfiehlt für Säuglinge mindestens 200 Internationale Einheiten. Nach Ansicht vieler Forscher genügt das aber nicht einmal zur Verhütung von Rachitis. Die aktuelle empfohlene Tagesdosis für Erwachsene liegt je nach Alter zwischen 200 und 600 Internationalen Einheiten. Das halten Forscher von der Harvard School of Public Health und Kollegen jedoch für zu wenig. Nach der Auswertung mehrerer Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Vitamin-D-Aufnahme und 25D-Produktion im vergangenen Jahr sind sie der Meinung, dass die Hälfte aller Erwachsenen in den Vereinigten Staaten mindestens 1000 Internationale Einheiten Vitamin D3 am Tag einnehmen müsste, um ihre 25D-Serumkonzentration auf das für die Gesundheit erforderliche Mindestniveau von 30 Nanogramm pro Milliliter zu bringen.

Leider gibt es keine allgemein gültige Faustregel für die 25D-Produktion durch Vitamin-D-Präparate, da sie individuell sehr verschieden ist und auch vom Grad der Unterversorgung abhängt. So zeigte eine Untersuchung an schwangeren Frauen, dass bei einer täglichen Dosis von 6400 Internationalen Einheiten der 25D-Spiegel zunächst in die Höhe schoss, ab einem Wert von 40 Nanogramm pro Milliliter aber kaum noch stieg.

Zwar kann man sich mit Vitamin-D-Präparaten auch eine schädliche Überdosis verabreichen – normalerweise aber nur bei Einnahme von mindestens 40 000 Internationalen Einheiten am Tag über längere Zeit hinweg. Eine Vitamin-D-Toxizität durch Sonnenlicht wurde bisher nicht beobachtet. Eine hellhäutige Frau, die im Sommer im Bikini ein Sonnenbad nimmt, bildet in 15 bis 20 Minuten etwa 100 000 Internationale Einheiten Vitamin D. Danach stagniert dieser Wert aber, weil UV-Strahlung das Vitamin auch zerfallen lässt – was verhindert, dass sich zu viel davon in der Haut bildet.

Wir können also festhalten: Es gibt immer mehr Anhaltspunkte dafür, dass ein Vitamin-D-Mangel, und sei er auch nur gering, eine Reihe negativer Folgen hat, die oft erst später im Leben auftreten. So kann es vermehrt zu Knochenbrüchen, Infektions- und Autoimmunerkrankungen oder zu einer Anfälligkeit für bestimmte Krebsarten kommen. Nach den bisherigen Forschungsergebnissen scheint eine Kampagne zur Aufklärung der Öffentlichkeit über den umfassenden physiologischen Nutzen von Vitamin D daher dringend geboten. Eine einmütige Empfehlung über eine sinnvolle Sonnenexposition seitens der Ärzteschaft sowie eine klare Aussage über die optimale Tagesdosis und darüber, wie sie erreichbar ist, könnten dazu beitragen, den Gesundheitszustand weiter Teile der Weltbevölkerung wesentlich zu verbessern. ◁

FOTOS: ANA PALIJAN

John H. White leitet eine Arbeitsgruppe in der Abteilung Physiologie der McGill University in Montreal (Kanada). **Luz R. Tavera-Mendoza** hat bei ihm promoviert und arbeitet inzwischen als Postdoc an der Harvard Medical School in Boston (Massachusetts). Da beide bei ihren Forschungsarbeiten hautnah miterlebten, wie Vitamin D die Gesundheit schützt, führen sie es sich in der dunklen Jahreszeit, wenn die Sonne zu schwach ist, um genügend davon in der Haut zu produzieren, mit Nahrungsergänzungsmitteln zu. White nimmt täglich 4000, Tavera-Mendoza 1000 Internationale Einheiten D3.

Holick, M. F.: Vitamin-D-Deficiency. In: New England Journal of Medicine, Bd. 357, No. 3, S. 266 – 281, 2007.

Lin, D. R., White, J. H.: The Pleiotropic Actions of Vitamin. In: BioEssays 26(1), S. 21 – 28, 2004.

Vieth, R. et al.: The Urgent Need to Recommend an Intake of Vitamin D that is Effective. In: American Journal of Clinical Nutrition 85, S. 649 – 650, 2007.

Wang, T.-T. et al.: 1,25-Dihydroxyvitamin D3 is a Direct Inducer of Antimicrobial Peptide Gene Expression. In: The Journal of Immunology 173, S. 2909 – 2912, 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957493.

WARUM HUNDE SO VERSCHIEDEN SIND

Kein anderes Haustier bildet derart unterschiedliche Rassen. Genetiker erkennen zunehmend, welche Erbanlagen – aber auch komplexen genetischen Mechanismen – dahinterstecken.

Von Elaine A. Ostrander

Ein Pekinese wiegt gerade ein paar Pfund, manch ein Bernhardiner bringt es auf 90 Kilo. So unähnlich beide aussehen – sie gehören trotzdem zur selben Art oder Biospezies. Nicht nur Hundefreunde und Züchter interessiert, wie die riesigen Unterschiede zwischen den vielen Rassen beim Haushund zu Stande kommen und wie es gleichzeitig sein kann, dass die Tiere einer Rasse einheitlich aussehen. Auch Säugetiergenetiker widmen sich in den letzten Jahren verstärkt solchen Fragen.

Hauptsächlich wollten die Forscher klären, welche Gene die diversen Krankheiten von Rassehunden mitverschulden, als sie Anfang der 1990er Jahre das »Hundegenomprojekt« ins Leben riefen. Zuchtverbände unterscheiden heute bis zu mehrere hundert Rassen. Die meisten davon existieren erst seit höchstens einigen Jahrhunderten. Oft sind sie in sich genetisch wenig vielfältig – zum einen, weil die Zucht einer neuen Rasse meist auf ganz wenigen, nah miteinander verwandten Tieren aufbaut, zum anderen, weil es nicht selten vorkommt, dass ein Typ plötzlich kaum noch gefragt ist und fast verschwindet, dann aber neuerlich Mode wird und aus einem ganz kleinen Genreservoir wieder auflebt. So erklärt sich, wieso besonders reinrassige Hunde vielfach an genetisch bedingten Krankheiten leiden. Die Genetiker versprechen sich von den Hundestudien aber auch Einsicht in eine Reihe von erblich bedingten Leiden, die ähnlich beim Menschen vorkommen – etwa bestimmte Arten von Krebs, manche Formen von Taubheit, Epilepsie, Diabetes, grauem Star oder bestimmte Herzleiden.

Hunde besitzen insgesamt 78 Chromosomen (der Mensch 46). Außer den beiden Geschlechtschromosomen (X und Y genannt) haben sie also 38 weitere Chromosomenpaare, die so genannten Autosomen. Nachdem die Forscher das Hundegenom mit seinen 2,4 Milliarden Basenpaaren zunächst grob kartiert hatten, gelang ihnen bald die Handhabe und Zuordnung auch einzelner großer DNA-Abschnitte. Bis zum Jahr 2003 hatten sie als Erstes knapp 80 Prozent der Erbsequenzen eines Pudels, eines Rüden, grob erfasst. Nicht lange danach konnten sie mit einer fast kompletten Sequenzierung des Genoms einer Boxerhündin aufwarten. Diese Sequenz dient heute als Referenzgenom des Hundes.

Die Möglichkeiten der Haustiergenetiker, erblichen Eigenschaften nachzuspüren, haben sich hierdurch tief greifend verfeinert. Wenn sie früher nach Erbhintergründen für eine Krankheit oder ein bestimmtes Merkmal suchten, setzten sie gewöhnlich bei bekannten Genen oder Genfamilien mit passenden Funktionen an. Manchmal kommt man so gut weiter, doch oft hat man viel Zeit und Geld umsonst eingebracht. Darum bedienen sich die Forscher heute zunehmend der raffinierteren Verfahren, die das Hundegenomprojekt eröffnet.

Dank dessen können wir nun zum Beispiel leichter den genetischen Hintergrund von Zuchtrassen erfassen. Auch gewinnen wir neue Anhaltspunkte, welche körperlichen Merkmale wir zu Hilfe nehmen können, um nach kritischen Erbanlagen zu suchen. Entscheidend weitergekommen sind wir zudem in Fragen der Kartierung von Genen für die Körpergröße, Statur und Muskelmasse.

Dass die Haushunde von Wölfen abstammen, gilt heute als gesichert (siehe Kasten S. 51). Die ersten gab es vielleicht schon vor 40 000 Jahren. Ihre Domestikation könnte somit wesentlich früher als die anderer Haustiere begonnen haben, möglicherweise in Südostasien. Viele der heute beliebten Rassen entstanden allerdings erst im 19. Jahrhundert in Europa durch gezielte Zucht. Vereinzelt wissen wir zwar von ganz ähnlichen Tieren

In Kürze

- Die **Entzifferung des Hundegenoms** ermöglicht neue Einblicke sowohl in Evolutionsmechanismen wie in Krankheitshintergründe.
- Genetiker beginnen aufzuklären, welche Erbanlagen **das völlig verschiedene Aussehen von Hunderassen** bestimmen. Die Studien geben Einblick in die Herkunft der Hundetypen und klären Verwandtschaften zwischen den Rassen.
- Der **Haushund** gilt – auch wegen seiner Rassenvielfalt –als ein **hervorragendes Tiermodell für viele menschliche Krankheiten**. Hier können Genetiker nun wesentlich leichter nach verantwortlichen Mutationen suchen.

aus der Antike, doch ist unklar, ob etwa der Greyhound oder der Pharaonenhund, beides große Windhunde, tatsächlich auf jene uralten Formen zurückgehen oder nach antiken Vorbildern neu gezüchtet wurden.

Wann man von einer eigenen Hunderasse spricht, ist nicht einheitlich festgelegt. Deswegen schwankt die von verschiedenen Verbänden angegebene Anzahl. Die internationale Vereinigung für Kynologie, F. C. I. (der Dachverband für Zucht und Haltung von Hunden), hat weit über 300 Rassen registriert. Auch werden immer wieder neue anerkannt. Bei manchen Verbänden müssen zum Beispiel sowohl die Eltern als auch die Großeltern als reinrassig registriert sein. Wegen solcher strengen Regularien stellen viele heutige Rassen quasi geschlossene Populationen dar, in die von außen kaum neue Genvarianten – Allele – einfließen. Fast zwangsläufig sind Rassehunde darum genetisch meist weniger heterogen als Mischlinge. Diesen Effekt verstärkt der Mensch noch, wenn er etwa bevorzugt Tiere zur Weiterzucht verwendet, die in Wettbewerben gesiegt haben.

Wie man heute Gene aufspürt

Um Hunderassen genetisch zu definieren, also gegeneinander abzugrenzen, benutzen Forscher, auch mein Team, unter anderem so genannte genetische Marker. So bezeichnen wir Stellen – Positionen – im Genom, wo die DNA-Sequenz mehrere Varianten haben kann, also in verschiedenen Versionen auftritt, die nach den klassischen Vererbungsregeln weitergegeben werden. Zum Beispiel wiederholen sich bei so genannten Mikrosatellitenmarkern kurze Sequenzen in der DNA verschieden oft. Hingegen variiert bei SNPs (gesprochen »snips«) ein einzelner Baustein, also ein einzelnes Nukleotid. Von der ersten Sorte kennen wir im Hundegenom Tausende, von der zweiten Millionen. Sie finden sich darin praktisch überall eingestreut. Ihnen benachbarte DNA-Abschnitte – auf die es uns ankommt, weil dort entscheidende Gene liegen könnten – vererben sich zusammen mit solchen Markern, also nach denselben klassischen Prinzipien.

Für unsere Studie standen uns 414 nicht näher miteinander verwandte Hunde aus insgesamt 85 Rassen zur Verfügung. Wir wählten 96 Mikrosatellitenmarker aus, die sich auf alle 38 Autosomen verteilen. Bei der statistischen Auswertung der umfangreichen Daten stellte sich heraus, dass allein hiermit jeweils jene Hunde tatsächlich eine eigene Gruppe bildeten, die wir einer eigenen Rasse zuordnen. Die wenigen Ausnahmen waren vor allem sechs Paare jeweils eng verwandter Rassen (wie Whippet und Greyhound oder Mas-

Unterschiedlicher können zwei Hunde kaum aussehen. Doch der Mischling aus einem Chihuahua und einem Zwergpudel und der Schottische Hirschhund oder Deerhound, ein Windhund, verstehen sich prächtig.

TYRONE SPADY UND ELAINE A. OSTRANDER

tiff und Bullmastiff). Sie zu unterscheiden gelang aber, als wir jeweils beider Daten isoliert von denen anderer Rassen betrachteten.

Auch erwies sich die genetische Variationsbreite zwischen verschiedenen Rassen als wesentlich größer als die innerhalb von einzelnen Rassen. Zwischen ihnen erreicht die Variation schätzungsweise 27,5 Prozent. (Zwischen verschiedenen Bevölkerungen des Menschen beträgt sie nur 5,4 Prozent). Das bedeutet, dass es wirklich getrennte Hunderassen gibt. Sie unterscheiden sich nicht nur äußerlich, sondern ganz klar auch genetisch. Als wir anschließend mittels einer Blindstudie prüften, ob die einzelnen Tiere allein auf Grund ihres genetischen Profils vom Computer der richtigen Rasse zugeordnet würden, landeten 99 Prozent der Hunde tatsächlich bei der korrekten Gruppe.

Als Nächstes untersuchte meine Mitarbeiterin Heidi Parker mit denselben Daten die Verwandtschaftsbeziehungen dieser 85 Rassen, konstruierte also gewissermaßen einen Stammbaum. Ein Computerprogramm von Jonathan Pritchard und seinen Kollegen von der University of Chicago erkannte an der Häufigkeitsverteilung von Allelen mehrere genetisch unterschiedliche Gruppen oder Cluster. Man darf vermuten, dass diese Cluster jeweils Rassen umfassen, die näher zusammengehören, weil ihre Vorfahren demselben Genpool entstammten. Unsere Analyse lieferte vier große Cluster, sortierte also die 85 untersuchten Hunderassen in vier Gruppen – darunter eine für vermutlich sehr alte Linien: mit Hundetypen, bei denen ein asiatischer beziehungsweise afrikanischer Ursprung vermutet wird (siehe Kasten S. 52). Als weitere Rassen in die Studie einbezogen wurden, kristallisierten sich zusätzliche Gruppen heraus.

Diese Verwandtschaftsdaten helfen bei der Suche nach Genen für Krankheiten. Denn in manchen Fällen wird man leichter fündig, wenn man hierzu mehrere Rassen aus demselben Cluster zusammenwirft. Das kann nicht nur nützen, um eine verdächtige Region im Genom grob einzugrenzen, sondern erleichtert auch die Feinkartierung. Deren Ziel ist, mit gut definierten DNA-Abschnitten handhabbarer Größe von ungefähr einer Million Basen zu arbeiten, wenn man anschließend Genkandidaten auf Mutationen prüft.

Als Forscher um Ewen Kirkness vom Institute for Genomic Research in Rockville (Maryland) im Jahr 2003 mit der Genomsequenz eines Pudels aufwarteten, hatten sie eine so genannte Übersichtssequenz erstellt. Sie hatten eineinhalb Durchläufe gefahren. Schätzungsweise sieben bis acht Durchgänge sind erforderlich, möchte man sichergehen, zumindest einmal möglichst alle der vielen tausend überlappenden Segmente zu erfassen, in die man ein Genom zum Sequenzieren zerlegt. Dieses Ziel erreichten im Jahr 2005 Kerstin Lindblad-Toh und ihre Kollegen vom Broad Institute in Cambridge (Massachusetts). Für den ersten Entwurf hatten sie das Genom einer Boxerhündin 7,5-mal gelesen. Die endgültige Version schließlich enthält davon fast 99 Prozent.

Gene mit störenden Einsprengseln

Beide Datensätze waren und sind für uns wertvoll. Die Übersichtssequenz von dem Pudel gab einen Eindruck, wie das Hundegenom aussieht, wie viele Gene es enthält und wie die Wiederholungselemente arrangiert sind. So überraschte, an wie vielen Stellen so genannte SINEs (kurze eingestreute Kernsequenzelemente) über das gesamte Genom verstreut auftauchen. Manche dieser Elemente befinden sich sogar an Positionen, wo sie sich auf die Genexpression auswirken können. Solch ein Element in dem Gen für den Rezeptor von Hypocretin (Orexin), einem Neuropeptidhormon im Hypothalamus, verschuldet beim Dobermann Narkolepsie, also anfallsartige Schlafattacken. Beim so genannten Merlefaktor sitzt ein SINE-Element in einem an der Pigmentierung beteiligten Gen. Fellpartien sind dann aufgehellt und gesprenkelt. Insbesondere Hunde, die den Faktor von beiden Eltern erhalten, haben oft schwere Sinnesschäden, sind zum Beispiel blind oder taub.

Die inzwischen vorliegende Sequenz vom Genom der Boxerhündin deckt dieses, wie gesagt, schätzungsweise zu 99 Prozent ab. Demnach scheinen Hunde rund 19 000 Gene zu besitzen. Drei Viertel davon ähneln hochgradig Genen des Menschen und der Maus. Im Hundegenom haben sich mehr als zwei Millionen SNPs angesammelt. Sie können als Anhaltspunkte dienen, um genetische Abweichungen – Varianten – innerhalb der Tiere einer Rasse wie auch zwischen verschiedenen

HUNDE UND IHRE KRANKHEITEN ALS MODELL

Einige hundert genetisch bedingte Krankheiten des Menschen treten ähnlich auch bei Hunden auf. Viele davon kommen nur bei einer Hunderasse vor. Das erleichtert jetzt wesentlich die Suche nach dem jeweiligen genetischen Hintergrund.

Rassen aufzuspüren und deren Folgen festzumachen, gerade auch wenn es sich um komplex gesteuerte Merkmale handelt.

Forscher verwenden bei solchen Studien zum Beispiel umfangreiche DNA-Chips, mit denen sich Genome einzelner Tiere recht schnell gezielt durchsehen lassen. Für den Hund gibt es bereits Chips mit ungefähr 127 000 SNPs. Sie erlauben, mehrere tausend Stellen des Genoms gleichzeitig abzufragen. Wollen wir etwa den genetischen Hintergrund einer Krankheit ergründen, sagen wir von Lymphomen, müssen wir Genome kranker und gesunder Hunde vergleichen. Auf solche Weise können wir uns rasch an Abschnitte herantasten, auf denen daran beteiligte Gene zu liegen scheinen.

Seit einigen Jahren forschen mein Team und andere Gruppen nach Genen, die das typische Erscheinungsbild einer Hunderasse bestimmen, also etwa Körpergröße, Statur und Aussehen. Denn nicht nur die Größe eines Hundes, auch seine Proportionen, die Kopfform, Beinlänge relativ zum Rumpf und vieles mehr beruhen mindestens zum Teil auf genetischer Steuerung. Kein anderes Säugetier tritt so mannigfaltig in Erscheinung.

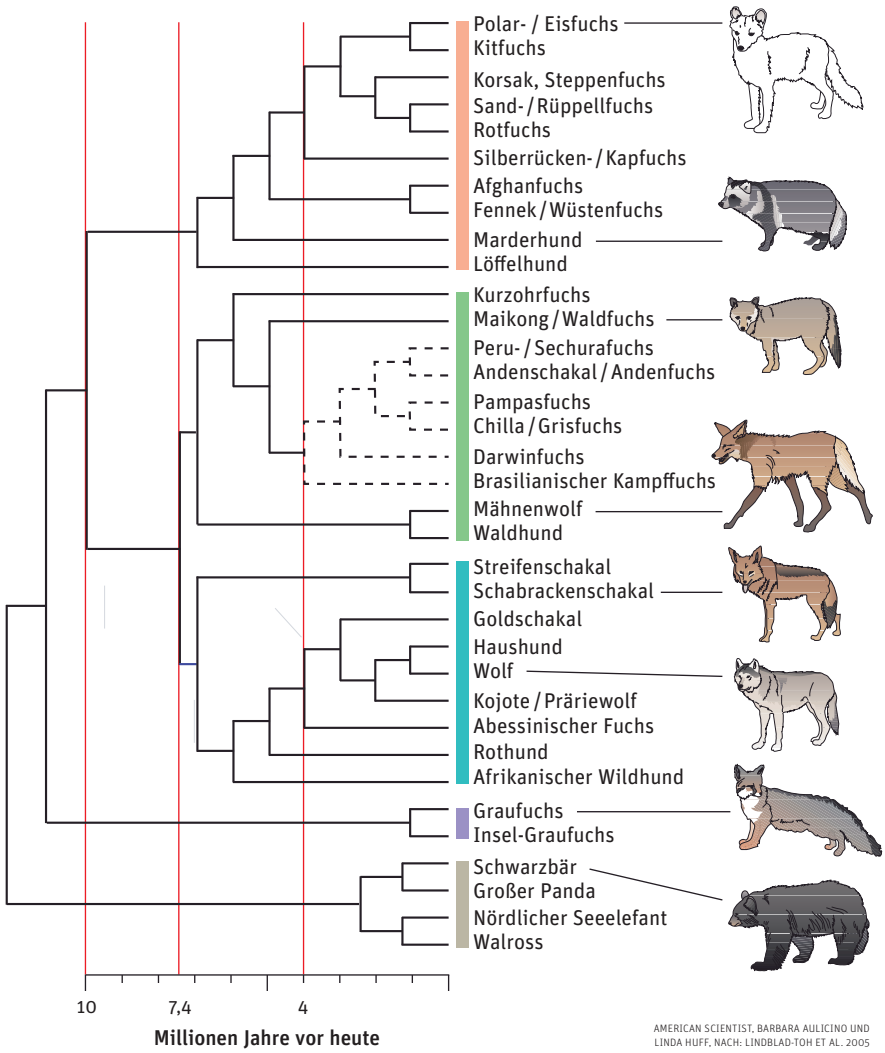
Die erste größere Untersuchung in diesem Bereich führten Gordon Lark und Kevin Chase von der University of Utah in Salt Lake City an Portugiesischen Wasserhunden durch, die sich früher Fischer für ihre Arbeit hielten. Diese Studien – Georgie-Projekt genannt nach einem Lieblingshund der Familie Lark – werden von den amerikanischen Züchtern und Haltern der Rasse unterstützt. Sie war im frühen 20. Jahrhundert fast ausgestorben, ließ sich dann aber noch retten. Die heutigen Tiere stammen von ganz wenigen Individuen ab, die meisten von zwei kleinen Zuchtgruppen, die Anfang der 1950er Jahre in die Vereinigten Staaten kamen. Trotz des kleinen Genpools und der Inzucht sind diese Hunde genetisch recht vielfältig, was sie als Objekt für solche Genstudien ideal geeignet macht (Bilder S. 53). Die Körpergröße etwa ist bei dieser Rasse längst nicht so streng eingegrenzt wie sonst oft. Den Züchtern ist vor allem wichtig, genetisch möglichst gesunde Tiere zu erhalten.

Inzwischen stehen den Forschern DNA-Proben von über 1000 Wasserhunden zur Verfügung. Mittels mehr als 500 Mikrosatellitenmarkern konnten sie bereits für fast die Hälfte der Tiere Übersichtsanalysen für das ganze Genom fertig stellen. Sie erfassten zudem Familien- und medizinische Daten. Auch machten sie pro Tier fünf Röntgenaufnahmen für Skelettmaße und -proportionen. So gewannen sie für fast 500 Hunde jeweils über 90 anatomische Messwerte, aus denen sie vier so genannte Hauptkomponenten – Sätze korrelierender Merkmale – errechneten, die den Skelettbau von Wasserhunden definieren.

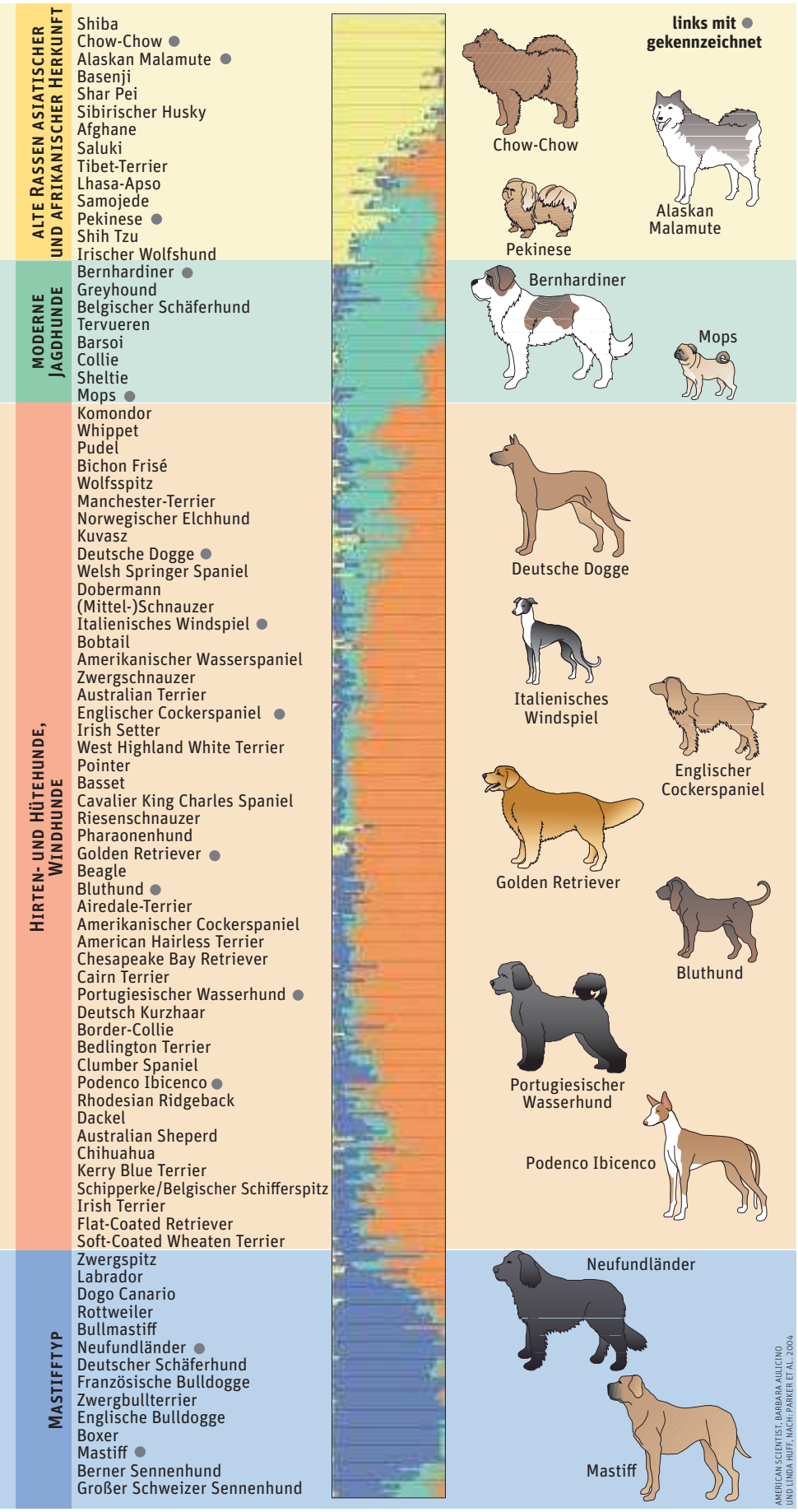
Mit Hilfe dessen gelang es, im genetischen Material der Wasserhunde auf 22 Chromosomen 44 Genorte zu lokalisieren, die offenbar in einer Beziehung zu erblichen Skelettseigenschaften dieser Rasse stehen. Mit dem gewählten statistischen Verfahren erhält man Hinweise auf Stellen im Genom, die gemeinsam zu einem bestimmten Merkmal beitragen. Uns interessierte dabei besonders ein Ort (Locus) auf Chromosom 15, der eine starke Verbindung zur Körpergröße erkennen ließ.

Nahe und ferne Verwandtschaft des Haushunds

Nach genetischen Analysen verteilen sich die Arten der Hunde (die systematische Familie der Kaniden) auf vier phylogenetische Gruppen. Die Zeitverhältnisse sind nur grob wiedergegeben. Unten ist die Verwandtschaft zu den nächsten anderen Raubtieren angedeutet. Statistisch nicht abgesicherte Zuordnungen sind gestrichelt gezeichnet.



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULICINO UND LINDA HUFF, NACH: LINDBLAD-TOH ET AL. 2005



85 Hunderassen gingen in diese Verwandtschaftsanalyse ein. Als die Autorin und ihr Team Allelcluster ermittelten und deren Ränge bestimmten, erhielten sie vier genetisch getrennte Rassengruppen. Die oberste Gruppe dürfte die ältesten Abstammungslinien enthalten.

Zwar deuteten die Analysen auf insgesamt sieben Orte im Genom hin, die bei der Größe anscheinend alle eine Rolle spielen. Doch wir wählten den Ort auf Chromosom 15 zum einen wegen des starken Zusammenhangs mit der Körpergröße und zum anderen, weil wir in seiner Nähe ein für das Merkmal verdächtiges Gen vermuten durften.

Um dieses Gen zu finden, suchten wir zunächst in einem DNA-Abschnitt von 15 Millionen Basenpaaren nach SNPs. Deren Muster bestimmten wir anschließend für alle Wasserhunde, deren Wuchshöhe wir in Erfahrung bringen konnten. Dabei stießen wir letztendlich auf eine Stelle nahe beim Gen für den Wachstumsfaktor IGF-1 (*insulin-like growth factor 1*, insulinähnlicher Wachstumsfaktor 1). Dieses Gen beeinflusst bei Mäusen und auch beim Menschen die Körpergröße.

Wie wir erkannten, weist der fragliche Bereich mit dem Wachstumsfaktor-Gen bei den Wasserhunden zu 96 Prozent eine von zwei so genannten Haplotypen auf (worunter Genetiker verschiedene Versionen, Allelmuster, eines Abschnitts im Genom verstehen). Den mit relativ kleinem Wuchs assoziierten Haplotyp nennen wir B, den für großen Wuchs I. Portugiesische Wasserhunde mit zweimal dem Haplotyp B sind durchschnittlich am kleinsten, diejenigen mit zwei I-Haplotypen am größten. Dazwischen fallen Hunde, die beide Versionen besitzen.

Könnten Varianten an dieser Stelle auch allgemein die Körpergröße einer Hunderasse mitbestimmen? Wir prüften den fraglichen Abschnitt von Chromosom 15 bei 353 Tieren, wobei wir wiederum SNP-Marker zu Hilfe nahmen. Die Hunde stammten von 14 kleinwüchsigen und 9 sehr großen Rassen. Tatsächlich ergab der Vergleich Hinweise darauf, dass jenes Wachstumsfaktor-Gen für den Kleinwuchs einer Rasse verantwortlich ist. Insbesondere fiel uns auf, dass kleine Rassen davon oft auf beiden Chromosomen den gleichen Haplotyp tragen. Demnach dürften die Züchter, die immer kleinere Hunde wünschten, hier eine starke Selektion ausgeübt haben. Im Übrigen herrschte bei den kleinen Rassen unserer Studie, auch wenn sie miteinander nicht verwandt waren, ein einzigartiger Haplotyp vor, der bei den großen Rassen so gut wie nicht auf-

BEIDE FOTOS: SILKE HOLLUE-SCHUMACHER

Der Portugiesische Wasserhund stellt wahrscheinlich eine uralte Hunderasse dar. Die Fischergehilfen bekamen die praktische »Löwenmähne« schon in der Antike verpasst. Die heutigen Tiere stammen allerdings von ganz wenigen Hunden ab, die es Anfang des 20. Jahrhunderts noch gab.

tauchte. Die Mutation dürfte somit recht alt sein und reicht vermutlich weit in die Geschichte des Haushunds zurück.

Das Wasserhundprojekt lieferte eine Reihe anderer interessanter Genorte für Körperbaumerkmale, darunter solche, die anscheinend in Beziehung zur Kopfform, zur Körpergröße oder zur Beinlänge stehen. Daneben fanden die Forscher Stellen mit Genen, die vermutlich den Größenunterschied zwischen Rüden und Hündinnen bestimmen – ein typisches Merkmal der meisten Säugetiere. Genau ist nicht geklärt, wie dieser so genannte Geschlechtsdimorphismus bei Säugern generell zu Stande kommt. Wir wissen zwar, dass ein bestimmter Genort des Y-Chromosoms für die Ausbildung vom Geschlecht und der geschlechtstypischen Größe wichtig ist. Doch eindeutig kennen wir damit nur einen Teil der Faktoren.

Warum Rüden größer sind

Die Daten vom Portugiesischen Wasserhund halfen hier weiter. Zunächst zeigte sich, dass das Chromosom 15 einen Genort trägt, der im Wechselspiel mit anderen Genen steht und so die Männchen größer und die Weibchen kleiner werden lässt. Ob das erwähnte Wachstumsfaktor-Gen dahinter steckt, muss sich noch herausstellen.

Beim Portugiesischen Wasserhund sind die Hündinnen durchschnittlich um 15 Prozent kleiner als die Rüden. Bei den Hündinnen geht ein bestimmter Haplotyp jenes Bereichs mit geringer Größe einher, so erkannten Chase, Lark und ihre Kollegen. Ein anderer Haplotyp, also ein anderer Satz von Varianten, scheint bei Rüden zu bestimmen, dass sie eher groß werden. Dabei interagiert der Genort (Locus) auf dem Chromosom 15 mit einem Ort auf dem X-Chromosom, der auch bei zwei vorhandenen X-Chromosomen, also bei den Weibchen, nicht stillgelegt wird.

Besitzt eine Hündin auf beiden X-Chromosomen den gleichen Haplotyp, und verfügt sie zudem auf Chromosom 15 zweimal über den Haplotyp für ein großes Körpermaß, dann erreicht sie durchschnittlich die Höhe eines stattlichen Rüden. Trägt die Hündin dagegen zwei verschiedene Versionen auf den Geschlechtschromosomen, bleibt sie klein, egal, wie Chromosom 15 ausgestattet ist. Wie soll man das erklären? Hilft dieser Befund verstehen, wie Gene im Wechselspiel miteinander auf komplexe Merkmale wie die Körpergröße einwirken? Zeigt er vielleicht sogar auf, wie dieser Geschlechtsdimorphismus in der Evolution entstand?

Eigenartig ist ja, wieso auf dem Chromosom 15 bei Männchen und Weibchen gegensätzliche Haplotypen vorherrschen. Chase und seine Kollegen postulieren einen weiteren genetischen Faktor – vielleicht auf demselben Locus auf Chromosom 15 wie das Wachstumsfaktor-Gen –, der dieses Gen bremst. Jener neue Faktor wäre geschlechtsspezifisch, nämlich nur dem »weiblichen« Haplotyp zugeordnet. Ein hypothetischer Haplotyp A, der nur das Wachstumsfaktor-Gen enthält, würde bei Rüden wie Weibchen für ein höheres Körpermaß sorgen. Der Haplotyp B würde das zusätzliche Gen tragen, welches ersteres Gen herunterreguliert und somit das Tier nicht so groß werden lässt.

Was hat das aber mit dem Genort auf dem X-Chromosom zu tun? Wieso entscheidet sich von dort her die Größe der Hündin? Vorstellbar wäre, dass das Gen auf dem Chromosom 15, das für mehr Wachstum sorgt, erst anspringen kann, wenn das X-Chromosom ein entsprechendes Signal liefert.

Die geschilderten Befunde passen zu einer These vom Anfang der 1980er Jahre. Demnach wurden die Säugetierweibchen nachträglich kleiner als die Männchen, als Selektionskräfte

Ein Genort auf dem X-Chromosom entscheidet über die Körpergröße einer Hündin, allerdings nicht allein

CORBIS, CHRIS COLLINS

Seit Genetiker das Hundegenom kartiert und sequenziert haben, können sie Hintergründe für typische Eigenschaften von Hunderassen erforschen.

einen Größenunterschied der Geschlechter förderten. Nachträglich würden dadurch Mechanismen entstanden sein, die auf Wachstumsgene hemmend einwirken.

Nicht alle morphologischen Merkmale, die Hundegenetiker untersuchen, haben einen so komplexen genetischen Hintergrund. Denn manche Unterschiede im Körperbau lassen sich gut auf ein einzelnes Gen zurückführen. Im folgenden Beispiel, das wir untersucht haben, geht es um das Gen für Myostatin beim Whippet, einem beliebten kleinen englischen Windhund. Myostatin ist ein Protein aus dem Kreis der Wachstumsfaktoren, das den Aufbau von Muskelgewebe einschränkt. Whippets wiegen etwa neun Kilogramm und ähneln ansonsten dem größeren Greyhound. Normalerweise sind diese Tiere eher zierlich gebaut und ausgesprochen schlank und langgliedrig. Sie haben auch einen schmalen Kopf mit spitzer Schnauze und einen langen Hals. Doch manche Whippets sind bullige Muskelpakete (Bild unten), die mit ihrer breiten Brust, kräftigen Nackenpartie und den auffallend muskulösen Beinen überhaupt nicht ins Bild dieser Rasse passen. Die Züchter würden darum gern mit einem speziellen Gentest vorsorgen, damit möglichst wenige solche Tiere entstehen.

In England bezeichnet man Whippets gern als Rennpferd des kleinen Mannes. Die meisten dieser kleinen Windhunde sind zierlich gebaut (links). Aber immer wieder treten bullige, muskelbepackte Tiere auf. Daran ist ein einziges Gen schuld.

LAIF / POLARIS, STUART ISETT

Wir stießen bei den Whippets auf eine neue Mutation im Myostatin-Gen, das hierdurch nur ein lädiertes Protein zu Stande bringt. Die bulligen Hunde tragen dieses mutierte Gen (Allel) auf beiden der zueinander gehörigen Chromosomen, haben davon also zwei Kopien und kein normales Gen. Einen Befund dieser Art hatten wir im Grunde erwartet, denn bekannt war bereits, dass auch bei Mäusen, Rindern und Schafen auffallend muskulöse Tiere heranwachsen, wenn das Myostatin-Gen defekt ist. Ähnliches ist sogar vom Menschen von ganz wenigen Fällen bekannt.

Interessanterweise besitzen auch Tiere mit einem defekten und einem normalen Gen für Myostatin durchschnittlich mehr Muskeln als ein klassischer Whippet, wenn sie auch bei Weitem nicht so bepackt daherkommen wie der bullige Typ. Ihr Brust- und Halsumfang ist etwas mächtiger, auch wiegen sie im Verhältnis zur Körperhöhe etwas mehr. Eine solche Mutation bedingt nach unserer Schätzung 60 Prozent der Variation beim Halsumfang und beim Verhältnis von Gewicht zu Größe sowie 31 Prozent der Variation bei den Brustmaßen eines Whippets.

Nun werden mit Whippets auch gern Rennen veranstaltet. Eignen sich dazu etwa Tiere mit einem normalen und einem mutierten Allel für Myostatin besonders gut? Sind diese im Durchschnitt womöglich schneller als die schlanken Exemplare? Und werden gerade sie deswegen bevorzugt in der Rennhundzucht eingesetzt? Falls ja, würden zwangsläufig immer wieder auch bullige Hunde geboren – sobald Mutter und Vater je ein schadhaftes Gen beisteuern. Unsere statistische Analyse bestätigte unseren Verdacht: Tiere mit einer Kopie des mutierten Gens fanden sich häufiger in der höchsten Klasse dieser Rennhunde als die mit zwei normalen Allelen.

Jeder zweite Whippet der A-Klasse trug die Mutation. Bemerkenswerterweise kam das defekte Gen am wenigsten bei Tieren vor, die nicht zu Rennen herangezogen werden, sondern allein auf Hundeschauen auftreten. Wir konnten auch zeigen, dass die A-Klasse-

Hunde dieses Allel nicht allein deswegen so häufig aufweisen, weil die besten dieser Rennhunde am liebsten untereinander verpaart werden. Übrigens besitzen nach unseren Studien weder Greyhounds noch die muskulösen Mastiffrassen wie die Bulldogge diese Variante des Myostatin-Gens.

Das genetische Wissen über den Hund ist in den letzten drei Jahren beträchtlich angewachsen. Die Forscher haben sein Genom kartiert und sequenziert. Sie konnten bereits viele Genorte eingrenzen, die mit Krankheiten zusammenhängen. Vielfach fanden sie darin schon schuldige Mutationen. Allmählich sehen wir auch die Verwandtschaft der Hunderassen untereinander immer klarer.

Über den Hund hinaus

Dass einige grundlegende Erkenntnisse über den Aufbau – die Organisation – des Hundegenoms vorliegen, bewerten die Forscher als weiteren wichtigen Schritt. Zudem können sie sich inzwischen sogar an genetische Zusammenhänge bei komplex gesteuerten Merkmalen herantasten. Erste Einblicke, wie unterschiedliche Körpergrößen oder Wuchsformen zu Stande kommen, gelangen uns bereits. Selbst Hintergründe von manchen Verhaltensleistungen beginnen wir aufzuklären.

Für viele Krankheiten und Fehlentwicklungen mit erblichem Hintergrund erwarten wir, dass die Zahl kartierter dafür verantwortlicher Gene bald geradezu explosiv anwächst. Seit Langem versuchen Wissenschaftler herauszufinden, welche genetischen Fehler beim Hund an bestimmten Krebsarten oder Herzleiden, Hüftdysplasie, Seh- und Hördefekten beteiligt sind. Die neuen Analysemöglichkeiten erleichtern diese Arbeit wesentlich.

Somit könnten für Züchter bald Tests auf Gene für Krankheiten, die beim einzelnen Tier nicht durchbrechen, zur Verfügung stehen. Anhand der Ergebnisse ließen sich gesunde Tiere mit langer Lebenserwartung leichter gezielt erzeugen. Des Weiteren würden entsprechende Gentests eine Zucht zum Beispiel auf eine gewünschte Körpergröße oder Fellfarbe vereinfachen. Solche Tests werden sicherlich rasch verfügbar sein, sobald die Forscher die genetischen Hintergründe für ein bestimmtes Merkmal verstehen. Vielleicht werden Genetiker eines Tages sogar mentale Eigenschaften von Hunderassen erklären können – also etwa aufzeigen, wieso ein Vorstehhund das Wild nur anzeigt und davor erstarrt, und wieso ein Hütehund eine Schafherde zusammenhält.

Ob die Forscher jemals aufdecken werden, warum gerade der Hund zum besten Freund des Menschen wurde, bleibt offen. Vielleicht ist das auch gut so. ◁

Elaine A. Ostrander ist Genetikerin bei den amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland). Sie leitet dort am National Human Genome Research Institute den Bereich Krebsgenetik.

Ganslosser, U., Sillero-Zuberi, C. (Hg.): Wilde Hunde. Filander, Fürth 2006.

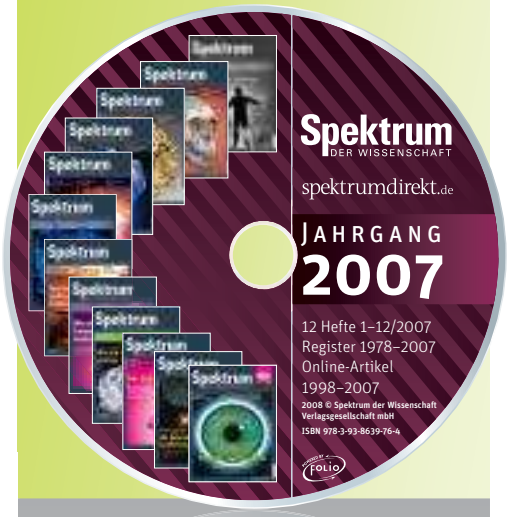
Lindbladh-Toh, K. et al.: Genome Sequence, Comparative Analysis and Haplotype Structure of the Domestic Dog. In: Nature 438, S. 803–819, 8. Dez. 2005.

Parker, H. G. et al.: Genetic Structure of the Purebred Domestic Dog. In: Science 304, S. 1160–1164, 21. Mai 2004.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957494.

EIN STARKER JAHRGANG ...



... ist die CD-ROM 2007 von **Spektrum der Wissenschaft.** Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,– (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland); Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

www.spektrum.de/lesershop

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3–5 | 69126 Heidelberg | Tel 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Der Tunguska-Explosion auf der Spur

Seit hundert Jahren rätseln Wissenschaftler über die Ursache einer riesigen Explosion, die im Jahr 1908 Zentralsibirien erschütterte – bislang vergeblich. Bei einer abenteuerlichen Expedition stieß ein Forscherteam nun auf Hinweise, mit deren Hilfe es gelingen könnte, das Geheimnis bald zu lüften.

Von Luca Gasperini, Enrico Bonatti und Giuseppe Longo

In Kürze

- Vor genau 100 Jahren explodierte ein Komet oder ein Asteroid einige Kilometer über dem unbewohnten **Tunguska-Gebiet in Zentralsibirien**. Zu den Folgen dieses »Tunguska-Ereignisses« gehörte die großflächige Zerstörung eines Waldgebiets.
- Obwohl sich schon zahlreiche Expeditionen dorthin auf den Weg gemacht haben, fand bislang noch niemand ein Bruchstück eines Objekts aus dem Weltraum oder einen Einschlagkrater.
- Nun entdeckte eine Gruppe italienischer Wissenschaftler in ungefähr zehn Kilometer Entfernung vom Epizentrum der Explosion **Hinweise auf einen Einschlagkrater**. Zudem deuten ihre Untersuchungen auf ein tief in den Boden vergrabenes Objekt, möglicherweise ein Fragment der Explosion. Könnte das Tunguska-Rätsel schon bald gelöst werden?

Es geschah am 30. Juni 1908 um 7 Uhr 14 am Morgen in Zentralsibirien. Semen Semenjow erlebte die Explosion mit eigenen Augen und sah, wie »sich der Himmel teilte. Über dem Wald erschien eine hohe und breite Feuerwalze. Von dort, … wo das Feuer loderte, ging eine enorme Hitze aus. … Dann verdunkelte sich der Himmel, es war ein heftiger, dumpfer Schlag zu hören, und ich wurde nach hinten geschleudert ... Danach ertönte ein Krachen, als … würden Kanonen abgefeuert, und die Erde bebte«.

Der russische Bauer gehört zu jenen Augenzeugen, die dem Entsetzen erregenden Geschehen wohl am nächsten gewesen waren. Als Tunguska-Ereignis ging es mittlerweile in die Annalen ein: der in der modernen Menschheitsgeschichte vermutlich heftigste Einschlag eines Objekts aus dem Weltraum auf der Erde. Semenjow selbst befand sich etwa 65 Kilometer vom Ort der Explosion entfernt, doch sogar aus Nordeuropa und Zentralasien berichteten Zeitgenossen von ausgedehnten, silbrigen Wolken und leuchtenden, farbenfrohen Sonnenuntergängen. Der Nachthimmel über Großbritannien war geradezu hell erleuchtet: Um Mitternacht sollen Londoner auf unbeleuchteten Straßen mühelos die Zeitung gelesen haben.

Auch Geophysiker registrierten das Ereignis anhand von Luftdruckwellen und seismischen Beobachtungen und orteten es in einem abgelegenen Teil Sibiriens. Das Epizentrum der Explosion lag nahe dem Fluss Podkamennaja Tunguska (»Steinige Tunguska«) – in einer unbewohnten Region der sumpfigen Taigawälder, wo der Boden während acht oder neun Monate in jedem Jahr gefroren ist.

Seit hundert Jahren fasziniert das Tunguska-Ereignis Wissenschaftler und interessierte Laien gleichermaßen – wohl auch deshalb, weil seine Ursache weiterhin im Dunkeln liegt. Zwar nehmen die meisten Forscher an, dass damals ein Objekt aus dem Weltraum, wohl ein Asteroid oder ein Komet, über dem sibirischen Himmel explodierte. Doch weder Bruchstücke noch Einschlagkrater wurden gefunden. Nun aber steht unser Team, nachdem es die jüngste der zahlreichen wissenschaftlichen Exkursionen in jenes Gebiet unternommen hat, vielleicht kurz vor einer aufregenden Entdeckung.

Das Tunguska-Ereignis ist kein Einzelfall in der Erdgeschichte, und genau darum ist seine Aufklärung so wichtig. Frühere Kollisionen mit extraterrestrischen Objekten hatten erhebliche Auswirkungen auf die Entwicklung der Erde und auf die Evolution irdischer Lebewesen. Vor rund 4,4 Milliarden Jahren beispielsweise scheint ein marsgroßer Asteroid unseren noch jungen Planeten getroffen und so viele Trümmer herausgeschlagen zu haben, dass daraus unser Mond entstand. Auch vor etwa 65 Millionen war es möglicherweise der Einschlag eines großen Objekts, der das Aussterben der Dinosaurier einleitete. Selbst in unserer Zeit beobachten wir Kollisionen von Himmelskörpern im Sonnensystem. Im Juli 1994 registrierten gleich mehrere Observatorien den spektakulären Aufprall mehrerer Fragmente des Kometen Shoemaker-Levy auf

den Planeten Jupiter. Und erst im vorigen September erschraken peruanische Dorfbewohner vor einem himmlischen Objekt, das über ihre Köpfe hinwegzog und schließlich einen 4,5 Meter tiefen und 13 Meter breiten Krater in den Erdboden schlug.

Mit Hilfe einer geeigneten Datenbasis lässt sich die Häufigkeit kleinerer Einschläge abschätzen. Peter Brown und seine Mitarbeiter an der kanadischen Universität von Western Ontario und am Los Alamos National Laboratory im US-Bundesstaat New Mexico verfügen über satellitengestützte Beobachtungen von Sternschnuppen, verglühenden Meteoroiden also, und über akustische Daten, die bei Einschlägen auf der Erdoberfläche gewonnen wurden. Ihre Ergebnisse extrapolierten sie auch auf größere Kollisionen. Die durchschnittliche Häufigkeit von Asteroideneinschlägen, die dem Tunguska-Ereignis ähneln, liegt ihren Ergebnissen zufolge bei etwa einem Ereignis in 200 bis 1000 Jahren. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass auch wir noch erleben, wie sich irgendwo auf der Erde ein weiterer Einschlag ereignet. Das Tunguska-Ereignis fand allerdings in einer unbewohnten Gegend der Erde statt. Bei einer vergleichbaren Explosion etwa über Berlin wäre aber das gesamte Stadtgebiet zerstört. Um uns auf eine solche Möglichkeit vorbereiten zu können, müssen wir besser verstehen, was beim Tunguska-Ereignis genau geschah.

Zunächst gilt es herauszufinden, ob es ein Komet oder ein Asteroid war, der den sibirischen Wald heimsuchte. In beiden Fällen käme es zwar zu mehr oder weniger vergleich-

Die riesige Explosion eines unbekannten Himmelskörpers (Illustration) über der sibirischen Taiga, deren Folgen noch über Großbritannien zu beobachten waren, zerstörte ein Waldgebiet von rund 2000 Quadratkilometer Fläche.

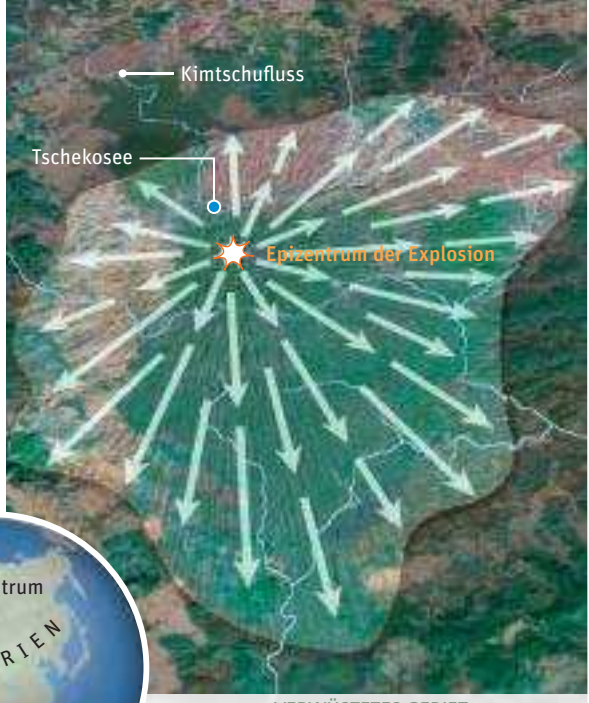
JAMES PORTO

DAS TUNGUSKA-EREIGNIS

Viele Forscher nehmen an, dass im Jahr 1908 ein Asteroid oder ein Komet über Zentralsibirien in die Erdatmosphäre eintrat und ungefähr fünf bis zehn Kilometer über dem Boden explodierte. Die Stoßwelle entwurzelte rund 80 Millionen Bäume. Das betroffene Areal umfasst etwa 2000 Quadratkilometer und ist damit zirka viermal so groß wie der Bodensee. War die Ursache des Ereignisses ein Asteroid, dann dürfte er einen Durchmesser von 50 bis 80 Metern gehabt haben. Trotz vieler Expeditionen blieb die Suche nach Bruchstücken des Objekts aber bislang erfolglos.

AP PHOTO

GEFÄLLTE BÄUME



VERWÜSTETES GEBIET

PHOTO RESEARCHERS / MARY EVANS PICTURE LIBRARY

EPIZENTRUM DER EXPLOSION

baren Folgen, doch es gibt einen wichtigen Unterschied. Kometen mit langen Umlaufdauern, die sich auf ihren Bahnen sehr weit von der Sonne entfernen, würden mit weitaus höheren Geschwindigkeiten auf die Erde aufprallen als Asteroiden. Letztere bewegen sich auf sonnennäheren Umlaufbahnen, verfügen über kürzere Umlaufdauern und sind entsprechend langsamer. Beim Aufprall eines kleinen Kometen könnte daher die gleiche Energie wie beim Aufprall eines wesentlich größeren Asteroiden frei werden.

Nun ist es für Astronomen recht schwierig, Objekte mit langen Umlaufdauern zu verfolgen, bevor sie in das innere Sonnensystem gelangen. Kometen kreuzen die Erdbahn zudem mit geringerer Wahrscheinlichkeit als Asteroiden. Aus beiden Gründen sind bestätigte Kometeneinschläge auf der Erde bislang unbekannt. Wäre das Tunguska-Ereignis tatsächlich durch einen Kometen verursacht worden, wären wir einem einzigartigen Ereignis auf der Spur. Andererseits: Trat an jenem Junimorgen der viel häufigere Fall eines explodierenden Asteroiden ein, warum wurden dann noch keine Bruchstücke gefunden?

Dass Fragen wie diese noch immer ungeklärt sind, beruht zum Teil auf der Abgeschiedenheit der zentralsibirischen Gegend. Hinzu kommen die politischen Wirren im Russland des frühen 20. Jahrhunderts, als das Zarenreich zerfiel und die Sowjetunion gegründet wurde. Die Untersuchung des Tunguska-Ereignisses verzögerte sich darum um fast 20 Jahre. Erst 1927 erreichte die erste Expedition den Ort der Katastrophe. Dem Team unter Leitung von Leonid Kulik, einem Meteoritenfachmann der russischen Akademie der Wissenschaften, bot sich ein unbeschreiblicher Anblick. Auf einer Fläche von 2000 Quadratkilometern waren Millionen von Bäumen entwurzelt worden. Noch in einigen Kilometern Entfernung vom Epizentrum der Explosion bildeten die liegenden Stämme ein radial nach außen weisendes Muster. Nahe dem Zentrum waren zahlreiche zum Teil verkohlte Baumstümpfe stehen geblieben. Kulik deutete die Verwüstungen als Folge des Einschlags eines Eisenmeteoriten und begann mit der Suche nach dessen Bruchstücken und dem Krater.

Wilde Spekulationen

In den späten 1920er und in den 1930er Jahren leitete Kulik noch drei weitere Expeditionen in das Gebiet. Doch ihnen war ebenso wenig Erfolg beschieden wie späteren Unternehmungen anderer Forscher. Weder fand man offensichtliche Einschlagkrater noch Bruchstücke eines wie auch immer gearteten Objekts, das dieses Areal getroffen haben könnte. Der Mangel an »Beweismaterial« ließ natürlich Raum für verschiedenste Erklärungsversuche. 1946 etwa beschrieb der Sciencefiction-Autor Alexander Kasanzew das rätselhafte Phänomen sogar als Explosion eines außerirdischen Raumfahrzeugs in der Erdatmosphäre.

Binnen weniger Jahre jedoch gewann die Theorie einer Explosion hoch über dem Erdboden die Anerkennung vieler Wissenschaftler, so dass sich weitere Spekulationen in Grenzen hielten. Ein in der Atmosphäre in fünf bis zehn Kilometer Höhe zerplatztes Objekt aus dem Weltraum konnte die meisten Beobachtungen erklären, die rund um das Epizentrum gemacht worden waren. Anhand von Aufzeichnungen seismischer Messstationen und Daten über das Ausmaß der Verwüstung ließ sich sogar abschätzen, in welcher

Beim Aufprall eines kleinen Kometen könnte die gleiche Energie wie beim Aufprall eines wesentlich größeren Asteroiden frei werden

Höhe die Explosion stattgefunden hatte und wie viel Energie dabei frei geworden war.

Das Fehlen eines Einschlagkraters deutete auch darauf hin, dass das Objekt vermutlich kein robuster Eisenmeteorit, sondern ein eher sprödes Gebilde gewesen war, zum Beispiel einer der relativ seltenen steinernen Asteroiden oder ein kleiner Komet. Russische Wissenschaftler favorisierten die Kometenhypothese: Solche Himmelskörper bestehen aus Staub- und Eisteilchen und würden daher keinen Einschlagkrater hinterlassen. Einer anderen Überlegung zufolge war die Verwüstung im Tunguska-Gebiet durch die explosionsartige Verbrennung von Methangas entstanden: Es soll aus dem sumpfigen Boden in die Luft entwichen sein und sich dort entzündet haben.

1975 untersuchte Ari Ben-Menahem erneut die vom Tunguska-Ereignis ausgelösten seismischen Wellen. Der Seismologe am Weizmann-Institut im israelischen Rehovot schätzte, dass die freigesetzte Explosionsenergie jener von 10 bis 15 Millionen Tonnen (Megatonnen) des Sprengstoffs TNT (Trinitrotoluol) entsprach – eine Sprengkraft vergleichbar der von über 1000 Hiroshima-Atombomben.

Seither versuchen Astrophysiker mit Hilfe numerischer Simulationen herauszufinden, welche der konkurrierenden Hypothesen die richtige sein könnte. Derzeit deutet vieles auf eine von einem steinernen Asteroiden hervorgerufene Luftdruckwelle hin. Modellen zufolge, die 1993 von einer Arbeitsgruppe um Christopher F. Chyba am Ames Research Center der US-Weltraumbehörde NASA erarbeitet wurden, besaß der Asteroid einen Durchmesser von einigen Dutzend Metern und explodierte mehrere Kilometer über dem Boden. Daten von Kernwaffentests in der Atmosphäre scheinen diese Hypothese zu stützen. Mit ihrer Hilfe ließen sich die Auswirkungen von Luftdruckwellen mit der Anordnung der durch das Tunguska-Ereignis gefällten Bäume vergleichen.

Neuere Simulationen von Natalia A. Artemiewa und Valery V. Shuwalow vom Moskauer Institut für Dynamik der Geosphären deuten auf einen Asteroiden ähnlicher Größe hin,

GIUSEPPE LONGO

AUS DER LUFT GESEHEN

Mit Hilfe virtueller Weltkarten wie Google Earth oder Microsoft Virtual Earth (http://earth.google.com oder www.microsoft.com/virtualearth) können Sie einen Blick auf den Tschekosee (Koordinaten: 60° 57' 50,40" Nord, 100° 51' 36,01" Ost) oder auf die Einschlagregion werfen (60° 54' 59,98" Nord, 101° 56' 59,98" Ost).

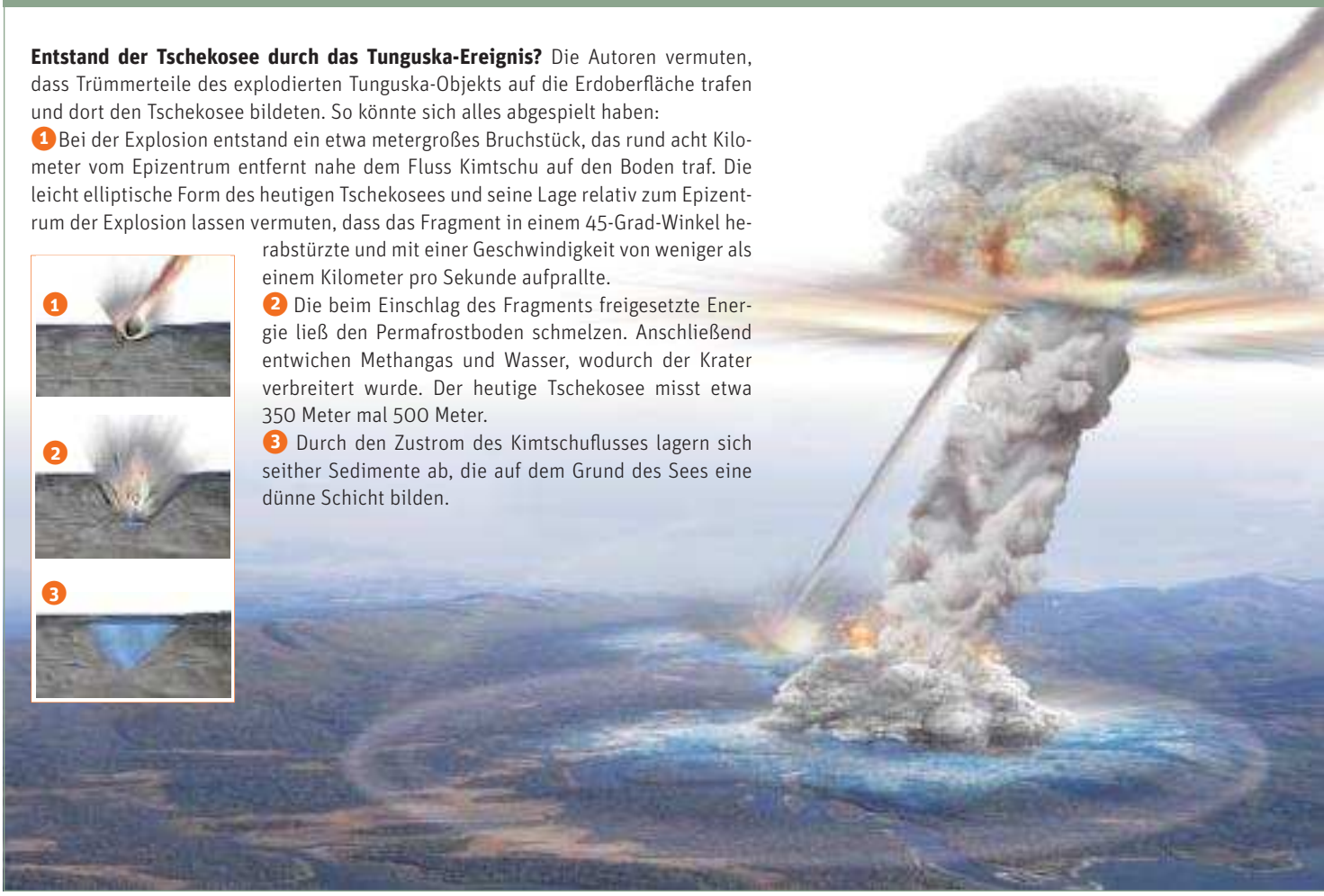
So könnte es gewesen sein

Entstand der Tschekosee durch das Tunguska-Ereignis? Die Autoren vermuten, dass Trümmerteile des explodierten Tunguska-Objekts auf die Erdoberfläche trafen und dort den Tschekosee bildeten. So könnte sich alles abgespielt haben:

1 Bei der Explosion entstand ein etwa metergroßes Bruchstück, das rund acht Kilometer vom Epizentrum entfernt nahe dem Fluss Kimtschu auf den Boden traf. Die leicht elliptische Form des heutigen Tschekosees und seine Lage relativ zum Epizentrum der Explosion lassen vermuten, dass das Fragment in einem 45-Grad-Winkel herabstürzte und mit einer Geschwindigkeit von weniger als einem Kilometer pro Sekunde aufprallte.

2 Die beim Einschlag des Fragments freigesetzte Energie ließ den Permafrostboden schmelzen. Anschließend entwichen Methangas und Wasser, wodurch der Krater verbreitert wurde. Der heutige Tschekosee misst etwa 350 Meter mal 500 Meter.

3 Durch den Zustrom des Kimtschuflusses lagern sich seither Sedimente ab, die auf dem Grund des Sees eine dünne Schicht bilden.



ALLE GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: KEVIN HAND

GRAFIK: KEVIN HAND

KOLLISIONSKURS

Apophis ist ein 300 Meter langer Asteroid, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 1 zu 45 000 im Jahr 2036 auf die Erde treffen könnte. Daher will die Planetary Society – eine gemeinnützige Organisation, zu deren Gründern auch der US-Astronom Carl Sagan gehörte – eine Sonde auf den Weg schicken, die die Flugbahn von Apophis beobachten soll. Die gewonnenen Daten sollen dazu dienen, die von dem Asteroiden ausgehende Bedrohung abzuschätzen und gegebenenfalls Abwehrmaßnahmen einzuleiten. Für den besten Vorschlag zum Bau einer geeigneten Sonde hatte die Planetary Society einen Preis von 25 000 US-Dollar ausgesetzt, der schließlich an das Unternehmen Space-Works Engineering im US-Bundesstaat Georgia ging. Es hatte die vergleichsweise einfach konstruierte **Raumsonde Foresight** (etwa: Voraussicht) vorgeschlagen, die rund 140 Millionen US-Dollar kosten dürfte. Sie soll zunächst einige Zeit in einer Umlaufbahn um den Asteroiden kreisen und ihn anschließend in einer Entfernung von nur zwei Kilometern **auf seiner Reise um die Sonne begleiten** und regelmäßig Daten zur Erde senden. Nun hofft die Gesellschaft, die nötigen Gelder einzusammeln.

der in fünf bis zehn Kilometer Höhe verdampfte. Ihrem Modell nach breiteten sich kleine Trümmerteile und eine abwärtsgerichtete Gasströmung großräumig in der Atmosphäre aus. Die Möglichkeit metergroßer Fragmente, die den Erdboden unweit des Epizentrums getroffen haben, schließen diese Untersuchungen jedoch nicht aus.

Gegen Ende des vorigen Jahres fand ein Team um Mark Boslough an den Sandia National Laboratories in Albuquerque (New Mexico) heraus, dass das Tunguska-Ereignis auch von einem viel kleineren Objekt als bislang angenommen ausgelöst worden sein könnte. Seine Supercomputer-Simulation zeigte, dass die Masse des zur Erde stürzenden kosmischen Objekts möglicherweise einen sich ausdehnenden Gasstrom hoher Temperatur erzeugte, der Überschallgeschwindigkeit erreichte. Das Modell deutete auch darauf hin, dass das auftreffende Objekt zunächst vom wachsenden Luftwiderstand der Erdatmosphäre verdichtet wurde. Beim Eindringen in tiefere Luftschichten führte der Luftwiderstand schließlich zur Explosion. Weil der Feuerball offenbar zusätzliche Energie zur Erdoberfläche hin übertrug, beträgt die Explosionsenergie Bosloughs Annahmen zufolge nicht, wie zuvor abgeschätzt, 10 bis 20 Megatonnen TNT, sondern wahrscheinlich nur drei bis fünf Megatonnen.

Mit Militärflugzeugen in die Wildnis

Unsere eigene Beschäftigung mit dem Tunguska-Ereignis geht auf das Jahr 1991 zurück. Damals nahm einer von uns (Longo) an der ersten italienischen Tunguska-Expedition teil, während der er nach möglicherweise in Baumharz eingeschlossenen Mikropartikeln der Explosion suchte. Später stießen wir auf zwei etwas obskure Artikel der russischen Wissenschaftler Vladimir A. Koshelev und Kirill P. Florensky. Sie berichteten von der Entdeckung eines kleinen Gewässers, des Tschekosees, rund acht Kilometer vom vermuteten Epizentrum der Explosion entfernt. 1960 hatte Koshelev ihn für einen möglichen Einschlagkrater gehalten. Florensky nahm dagegen an, der See stamme aus einer Zeit vor dem Tunguska-Ereignis, denn an seinem Grund waren lockere Sedimentschichten mit einer Dicke von insgesamt sieben Metern gefunden worden.

Doch allein die Tatsache, dass sich nahe dem Epizentrum ein See befindet, weckte unsere Neugier. Wir planten also, das Gebiet selbst in Augenschein zu nehmen und paläolimnologische Untersuchungen an den Bodensedimenten des Sees durchzuführen. Mit ihrer Hilfe wollten wir Informationen über vergangene Umweltereignisse gewinnen – ähnlich wie Unfallforscher die Blackbox eines abgestürzten Flugzeugs auswerten, um den Hergang des Unglücks zu rekonstruieren.

Einige Jahre später war es so weit. Unsere Reise nach Russland begann im Laderaum einer Iljuschin Il 20M, einer Propellermaschine, die während des Kalten Kriegs als Spionageflugzeug gedient hatte. Zuvor hatten wir Finanzmittel eingeworben und unser Vorhaben, unterstützt vom ehemaligen Kosmonauten Georgi M. Gretschko, mit Forschungsteams der staatlichen Universitäten in Moskau und Tomsk abgestimmt. Zunächst landeten wir auf einem Militärstützpunkt nahe Moskau und flogen dann über Nacht weiter ins zentralsibirische Krasnojarsk. Dort stiegen wir in den Bauch eines riesigen Mi 26 um, einen früher ebenfalls militärisch genutzten Schwerlasthubschrauber. Sechs Stunden lang hockten wir dann, mittlerweile verstärkt durch Kollegen von der Universität Tomsk, zusammengekauert zwischen unseren Ausrüstungsgegenständen, während der Lärm der Zwillingsturbomotoren uns allmählich taub werden ließ.

Doch schließlich erreichten wir unser Ziel inmitten der endlosen Taiga. Nachdem der Pilot den dunklen See einmal vorsichtig umrundet hatte, ließ er den Hubschrauber dicht über dem sumpfigen Seeufer schweben. Für eine Landung war der Boden zu weich, so dass wir abspringen mussten – und das ausgerechnet inmitten eines sintflutartigen Regengusses. Der Sturm, den die acht über unseren Köpfen vorbeirasenden Rotorblätter erzeugten, fegte uns fast weg, während wir die schweren Kisten ausluden. Dann endlich stieg der Hubschrauber mit dumpfem Röhren wieder in die Luft. Wir selbst, erschöpft und nass bis auf die Haut, blieben am Seeufer zurück, inmitten der wieder still gewordenen sibirischen Wälder. Wenig später hörte auch der Regen auf. Unsere Erleichterung war groß, aber nur von kurzer Dauer, denn gleich darauf stürzten sich ganze Schwärme aggressiver Stechmücken auf uns.

Die folgenden zwei Tage verbrachten wir damit, das Zeltlager einzurichten, den Katamaran zu montieren, den wir als Beobachtungsboot nutzen wollten, und die Ausrüstung zu überprüfen. Wir hatten Echolote dabei, ein Magnetometer, Sonargeräte und ein Radargerät für die Untersuchung des Untergrunds, außerdem Vorrichtungen zur Entnahme von Sedimentkernen und eine Unterwasserkamera. Schließlich verfügten wir auch noch über einen Satz von GPS-Satellitenempfängern, mittels derer die einzelnen Gruppen ihre jeweilige Position mit einer Genauigkeit von weniger als einem Meter feststellen konnten.

Mit dem Katamaran erkundete unser Team daraufhin zwei Wochen lang den See. Gepiesackt von Mückenschwärmen und Pferdebrem-

See mit Auffälligkeiten

GIUSEPPE LONGO

akustisches Profil (Ausschnitt)

Die Autoren untersuchten den Tschekosee mit Hilfe eines auf einem Katamaran angebrachten akustischen Echolots (großes Foto). Das Profil des Seebodens unter der Sedimentschicht ähnelt der Form eines Einschlagkraters (Computersimulation rechts). Außerdem fanden sie Hinweise auf ein etwa ein Meter großes Objekt unterhalb der Mitte des Seebodens (rundes Bild). Nun wollen die Forscher den See erneut aufsuchen und mit Hilfe einer Bohrung klären, ob dieses Objekt tatsächlich ein Bruchstück des dort im Jahr 1908 explodierten Himmelskörpers sein könnte.

GRAFIK: KEVIN HAND

AUS: LUCA GASPERINI ET AL., A POSSIBLE IMPACT CRATER FOR THE 1908 TUNGUSKA EVENT, TERRA NOVA 2007

sen, konzentrierten wir uns auf die Sedimente sowie auf die Struktur des Seebodens und der direkt darunter befindlichen Schichten. Unsere Kollegen widmeten sich anderen Aufgaben. Mit dem Radargerät kartierte Michele Pipan die Struktur des Erdbodens. Der Geophysiker von der Università degli Studi di Trieste arbeitete sich um den ganzen See herum, der etwa 500 Meter im Umfang misst, und durchleuchtete den Boden bis in eine Tiefe von drei bis vier Metern. Ein Team um Jewgenij Kolesnikow zog derweil Gräben durch Torfablagerungen in Ufernähe. In den Torfschichten hoffte der Geochemiker von der Universität Moskau, chemische Spuren des Tunguska-Ereignisses zu finden. Doch die Arbeit war mühsam, weil hier im Permafrostgebiet der Boden schon in geringer Tiefe sehr hart ist.

Existierte der Tschekosee vor 1908?

Romano Serra von der Università di Bologna und Valerij Neswetailo von der Universität Tomsk entnahmen unterdessen Proben aus Baumstämmen und untersuchten sie auf Anomalien in den Mustern der Jahresringe. Auch das Flugzeug, das uns nach Krasnojarsk gebracht hatte, kehrte an einem dieser Tage zurück und überflog das Gebiet, während ein Fotograf Luftaufnahmen anfertigte. Diese wollten wir mit den Bildern vergleichen, die Kulik sechs Jahrzehnte zuvor aufgenommen hatte.

Die untersten Sedimente im See, so unsere Vermutung, würden Spuren des Tunguska-Ereignisses enthalten. Wir hatten den See nur wenige Male überquert und dabei mit unseren hochauflösenden akustischen Geräten seinen Untergrund untersucht, da wurde bereits klar, dass die Schicht der den Seeboden bedeckenden Sedimente über zehn Meter dick ist. Ein kleiner Teil davon war vom Wind in das Gewässer befördert worden. Die meisten aber waren über den kleinen Fluss Kimtschu hineingelangt, der den Tscheko speist. Doch der See ist den größten Teil des Jahres gefroren. Wir gingen also davon aus, dass die Sedimentschicht durch diese Ablagerungen wahrscheinlich nur einige Zentimeter pro Jahr wächst. Eine sehr dicke Sedimentschicht würde also bedeuten, dass der See schon vor 1908 existierte, dem Jahr des Tunguska-Ereignisses.

Doch je weiter die Kartierung des Seebodens voranschritt, desto überraschter waren wir. In seiner Mitte ist der See etwa 50 Meter tief, zum Ufer hin steigt sein Boden steil an. Er ähnelt also einem Trichter, einem auf der Spitze stehenden Kegel. Wie eine solche Form entstanden sein könnte, lässt sich nur mit Mühe erklären. Wäre der See jahrtausendealt,

Woher stammen die dicken Sedimentschichten in einem See, der den Großteil des Jahres gefroren ist?

hätten die feinen Sedimente, die ihn allmählich füllten, vermutlich zu einem weit gehend flachen Boden geführt. Auch Kombinationsprozesse von Erosion und Sedimentation zogen wir in Betracht, wie sie für einen kleinen Fluss typisch sind, der sich durch eine relativ flache Landschaft schlängelt. An den Abenden diskutierte unser gesamtes Team diese Frage, während wir unter Regenplanen das köstliche russische Kascha verspeisten, ein traditionelles Essen aus geröstetem Buchweizen. Zu einer schlüssigen Begründung der Trichterform gelangten wir jedoch nicht.

Schon bald aber neigte sich unsere Zeit im Tunguska-Gebiet dem Ende zu. Am vorletzten Tag unseres Aufenthalts mühten sich die Expeditionsteilnehmer, das Boot zu zerlegen, die Ausrüstung zu verpacken und auch schon die meisten Zelte abzubauen. Als am nächsten Mittag der Hubschrauber eintraf, beeilten wir uns, alles zu verladen – ein letzter Kraftakt, denn auch dieses Mal konnte der Hubschrauber nicht landen. Doch schließlich stiegen wir wohlbehalten ein, und die Rückreise begann.

Zurück in unseren Instituten in Italien, werteten wir die gemessenen Bodentiefen genauer aus. Wir stellten fest, dass die Form des Tscheko sich deutlich von der anderer sibirischer Seen mit ihren gewöhnlich flachen Böden unterscheidet. Die meisten Seen der Region bilden sich in Vertiefungen, die durch Schmelzvorgänge in der allgegenwärtigen Permafrostschicht entstehen und schließlich mit Wasser volllaufen. Die trichterartige Form des Tscheko ähnelt hingegen bekannten Einschlagkratern ähnlicher Größe, etwa dem Odessa-Krater, der vor 25 000 Jahren beim Einschlag eines kleinen Asteroiden nahe der heutigen texanischen Stadt Odessa entstand.

Könnte der Tscheko tatsächlich ein wassergefüllter Einschlagkrater sein, entstanden im Jahr 1908 durch das Fragment eines Objekts aus dem Weltraum? Dieser Gedanke erschien uns nun immer attraktiver, so dass wir prüften, ob der See bereits zuvor existiert haben könnte. Zuverlässige Landkarten dieser unbesiedelten Region aus der Zeit vor 1908 sind nur mit Mühe aufzutreiben, doch schließlich fanden wir eine militärische Landkarte von 1883, die den See nicht verzeichnete. Auch Einheimische aus der Stadt Evenk berichteten, dass durch die Explosion von 1908 ein See entstanden war. Aber wenn er tatsächlich erst seit 100 Jahren existiert: Wie lässt sich dann die Dicke der Sedimentschichten an seinem Grund erklären?

Unsere seismischen Daten wiesen auf zwei unterschiedliche Sedimentzonen hin. Die obere ist etwa einen Meter stark und besteht aus fein geschichteten Ablagerungen, wie sie für eine ruhige Sedimentation typisch sind. Die Zone darunter fällt hingegen durch ihre ungeschichtete chaotische Struktur auf.

Die italienischen Paläobotanikerinnen Carla Alberta Accorsi von der Università di Modena und Luisa Forlani von der Università di Bologna fanden jüngst in einer Studie heraus, dass die oberen Sedimentschichten des Tscheko unzählige Spuren von Wasserpflanzen aufweisen. In den tieferen Schichten dagegen fehlen solche Spuren völlig, stattdessen enthalten sie große Mengen Pollen von Waldbäumen. Daher scheinen die »echten« Sedimentschichten des Sees nur rund einen Meter dick zu sein, was für ein geringes Alter spricht.

Geheimnisvoller Reflektor

Mit unseren Unterwasserkameras hatten wir im tieferen Teil des Sees auch die halb im Seeboden begrabenen Überreste von Baumstämmen untersucht. Ultraschallwellen, mit denen wir dasselbe Gebiet »durchleuchteten«, lieferten zudem Bilder einer charakteristischen haarartigen Struktur, die auf Überreste von Stämmen und Zweigen hindeuten könnten. Möglicherweise sind dies die Spuren eines ehemaligen Waldes, den das Tunguska-Ereignis vernichtet hatte und dessen Pollen in den tieferen Sedimentschichten aufgetaucht waren.

Vielleicht lassen sich diese Schichten so erklären: Ein Objekt aus dem Weltraum traf auf sumpfigen Boden, der seinerseits auf einer Dutzende Meter dicken Permafrostschicht auflag. Die Bewegungsenergie des Objekts wurde beim Aufprall in Wärme umgewandelt, was zum Schmelzen des gefrorenen Bodens führte. Dabei wurden Methan und Wasserdampf freigesetzt und der Krater so um ein weiteres Viertel vergrößert. Gleichzeitig schleuderte der Aufprall die schon vorhandenen Fluss- und Sumpfsedimente auf die Flanken des Einschlagkraters, wo wir mit unseren Ultraschallgeräten nun die chaotischen Schichten entdeckten.

Unser seismisches Profil des Sees zeigt zudem eine auffallend starke Reflexion, die von einem Ort einige Meter unter der Mitte des Seebodens stammt. Dort scheint sich ein guter Reflektor für akustische Wellen zu befinden, vermutlich ein etwa meterdickes felsiges Objekt. Oberhalb dieser Stelle entdeckten wir zudem eine schwache magnetische Anomalie. Sind auch das Hinweise auf ein Fragment des Tunguska-Objekts?

Wir sind höchst gespannt, dies herauszufinden, und werden nächstes Jahr zum Ort des Tunguska-Ereignisses zurückkehren. Dort nehmen wir dann eine Grabung in der Mitte des Tschekosees vor – in der Hoffnung, endlich das Geheimnis des rätselhaften reflektierenden Objekts zu lüften. ◁

Luca Gasperini (links), **Enrico Bonatti** und **Giuseppe Longo** (rechts) untersuchen das Tunguska-Rätsel seit vielen Jahren. Gasperini forscht am Institut für Meereskunde im italienischen Bologna. Bonatti ist Professor für Geodynamik an der römischen Universität La Sapienza und Gastwissenschaftler am Lamont-Doherty-Erdobservatorium der New Yorker Columbia University. Longo ist Professor für Physik an der Università di Bologna.

Chyba, C. F. et al.: The 1908 Tunguska Explosion: Atmospheric Disruption of a Stony Asteroid. In: Nature 361(40), S. 40 – 44, 1993.

Gasperini, L. et al.: A Possible Im-pact Crater for the 1908 Tunguska Event. In: Terra Nova 19(4), S. 245 – 251, 2007. Kostenfrei online: www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3121.2007.00742.x

Gasperini, L. et al.: Lake Cheko and the Tunguska Event: Impact or Non-Impact? In: Terra Nova 20(2), S. 169 – 172, 2008. Kostenfrei online: www.blackwell-synergy.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-3121.2008.00792.x

Longo, G.: The Tunguska Event. In: Comet/Asteroid Impacts and Human Society: An Interdisciplinary Approach. Springer, Heidelberg 2007.

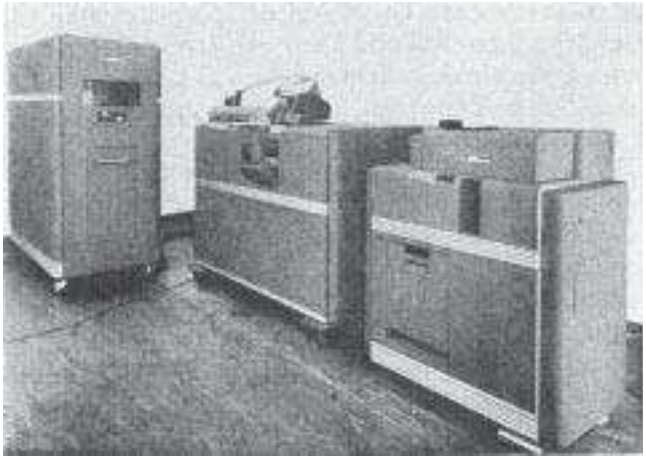
»Tunguska-Homepage« der Universitá di Bologna: www-th.bo.infn.it/tunguska

Weitere Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957492.

Hochleistungsrechenanlage

»Der neue Elektronenrechner IBM 628 benutzt für die Speicherung der Daten und die Durchführung von Rechenoperationen ausschließlich Magnetkerne, was eine bedeutsame Verbesserung in Bezug auf Sicherheit, Anpassungsfähigkeit und Arbeitsgeschwindigkeit bedeutet. Der Magnetkernspeicher hat eine Speicherkapazität von 320 Ziffern. Die reine Rechengeschwindigkeit der Maschine beträgt 5555 Additionen pro Sekunde, die Zugriffszeit zu den gespeicherten Angaben zehn Mikrosekunden pro Ziffer.« *Automatik, Heft 7, Juli 1958, 3. Jg., S. 183*

Memory-Monster:
Der Magnetkernrechner speichert bis zu 320 Ziffern gleichzeitig.



Unbekannte Höhenstrahlung

1958

»Inzwischen haben nach einer Mitteilung von J. van Allen die Explorer-Satelliten in Höhen von über 1500 km eine Zunahme der ionisierenden Strahlung auf den rund tausendfachen Wert gegenüber Höhen um 400 km verzeichnet. Die Strahlung war so stark, dass die Geigerzähler mehrfach aussetzten. … Charakter und Entstehung dieser Strahlung ist noch rätselhaft. Vielleicht handelt es sich um harte Röntgenstrahlung, die durch Einwirkung der von der Sonne ausgehenden Partikelströme auf die Restatmosphäre oder den Satellitenkörper entsteht.« *Naturwissenschaftliche Rundschau, Heft 7, Juli 1958, 11. Jg., S. 274*

Rhythmische Eiweißsynthese

»Werden in der Darmwand aus den resorbierten Aminosäuren (Bruchstücke aus dem Nahrungseiweiß im Darm) Serumeiweißkörper gebildet? Diese Frage wurde mit Hilfe von S-35 markiertem Methionin untersucht, das mit einem aus der Hefezucht gewonnenen Aminosäuregemisch verfüttert wurde. Eine intensive Eiweißsynthese konnte nachgewiesen werden, die aber nicht kontinuierlich, sondern rhythmisch erfolgte. Die von der Pfortader zur Leber transportierten Aminosäuren werden dort zunächst gespeichert und gelangen erst nach einer gewissen Zeit in das Lebervenenblut.« *Umschau, Heft 14, Juli 1958, S. 445*

1908

Fotografierte Sprache

»Ein junger Italiener namens Nicola Magnifico hat sich eine Erfindung patentieren lassen, welche die Photographie des gesprochenen Wortes zum Zwecke hat. Die Aufnahmemaschine kennzeichnet sich als ein Mikrophon, in dessen Stromkreis ein Galvanometer eingeschaltet ist. Hierdurch erhält das Aufnahmehäutchen die Eindrücke in Form einer Linie. Diese … läuft durch ein Strahlenbündel hindurch. Das Produkt dieses Vorganges wird auf eine Selenoidzelle projiziert, in deren Stromkreis ein telephonischer Hörer eingeschaltet ist.« *Central-Zeitung für Optik und Mechanik, Nr. 14, 15. Juli 1908, 29. Jg., S. 188*

Die Zentraluhr des Erdballs

»Der Gelehrte Bouquet de la Grye hat in einer der Pariser Akademie der Wissenschaften unterbreiteten Note davon gesprochen, dass eine Riesensendestation … elektrische Wellen rund um den Erdball senden und damit ein allgemeines Zeitsignal liefern könnte. … Er schlägt vor, zunächst einmal der Sache praktisch näher zu treten, so dass man unter Benutzung der schon bestehenden Einrichtung der Eiffelturmstation um Mitternacht ein Signal absende, das bei entsprechender Steigerung der Energie immerhin die Fläche des Atlantischen Ozeans bestreichen würde.« *Die Welt der Technik, Nr. 13, 1. Juli 1908, 70. Jg., S. 257*

Eine Fahrt mit dem wrightschen Flugapparat

»Über die Probeflüge, welche die Gebrüder Wright in Nord-Carolina unternommen haben, ist endlich wenigstens etwas durchgesickert. … Alle diejenigen, die den Flugversuchen beiwohnten, bestätigten, dass die Leistung der Maschine ganz ausgezeichnet war und dass sie mit dem 30 P.S.-Motor eine bemerkenswerte Geschwindigkeit erreichte. … Bei ihrem letzten Versuche beabsichtigten sie eine Stunde und 20 Minuten in der Luft zu bleiben, aber eine falsche Hebelbewegung veranlasste sie niederzugehen. … Man hofft, noch im Laufe dieses Jahres eine öffentliche Versuchsfahrt in der Nähe von New York veranstalten zu können.« *Die Umschau, Nr. 28, 11. Juli 1908, 12. Jg., S. 554*

Frei wie ein Vogel:
eine zeitgenössische Darstellung
der wrightschen Flugmaschine

SERIE: ARCHÄOLOGIE IN WESTAFRIKA
Teil I: Das Rätsel der Nok-Kultur SdW 7/2008
Teil II: Begann das Neolithikum in Afrika? SdW 8/2008
Teil III: Die Savanne – eine Kulturlandschaft SdW 9/2008

Das Rätsel der Nok-Kultur

Vor 2500 Jahren schufen Künstler im heutigen Zentralnigeria beeindruckende Plastiken aus Ton. Deutsche Archäologen deuten sie als Beweis früher gesellschaftlicher Komplexität.

Von Peter Breunig und Nicole Rupp

In Afrika stand die Wiege der Menschheit: Vor etwa vier Millionen Jahren erlernten Vormenschen der Gattung *Australopithecus* dort den aufrechten Gang. Gut zwei Jahrmillionen später grenzten sich in Afrika die ersten Vertreter der Gattung *Homo* noch weiter von den Menschenaffen ab. Schließlich tauchte auch der moderne Mensch, *Homo sapiens*, vor weit über 100 000 Jahren dort auf. Doch von da an schien Afrika, abgesehen von Ägypten, in eine Lethargie verfallen zu sein, aus der es noch nicht wieder erwacht ist. So zumindest dachten Forscher noch Mitte des 20. Jahrhunderts, und das Klischee hat sich in der Öffentlichkeit bis heute gehalten. Den Entwicklungsstand früher, schriftloser Kulturen können wir nur anhand ihrer materiellen Hinterlassenschaften beurteilen. Wenn Archäologen ihre Funde untersuchen, betrachten sie diese deshalb auch unter dem Aspekt gesellschaftlicher Komplexität: Was verraten die Artefakte über soziale Strukturen, also über Hierarchien und Arbeitsteilung in jener Gesellschaft? Gab es soziale oder technische Innovationen, um effizient zu wirtschaften? Lassen sich Hinweise auf eine differenzierte Glaubenswelt ausmachen?

In Westafrika führen solche Fragen in einen Bereich menschlicher Ausdrucksformen, der per se für einen hohen Entwicklungsgrad spricht und uns oft rätselhaft bleibt: die Kunst. Vor gut 2500 Jahren fertigten geschickte Handwerker im tropischen Wald des heutigen Nigeria ausdrucksstarke Terrakotta-Figuren von Menschen und Tieren, manche über einen Meter groß. Mitte des 20. Jahrhunderts wurde der britische Archäologe Bernard Fagg nahe dem Dorf Nok erstmals auf sie aufmerksam. Tief beeindruckt gab er ihren Schöpfern einen Namen: Nok-Kultur.

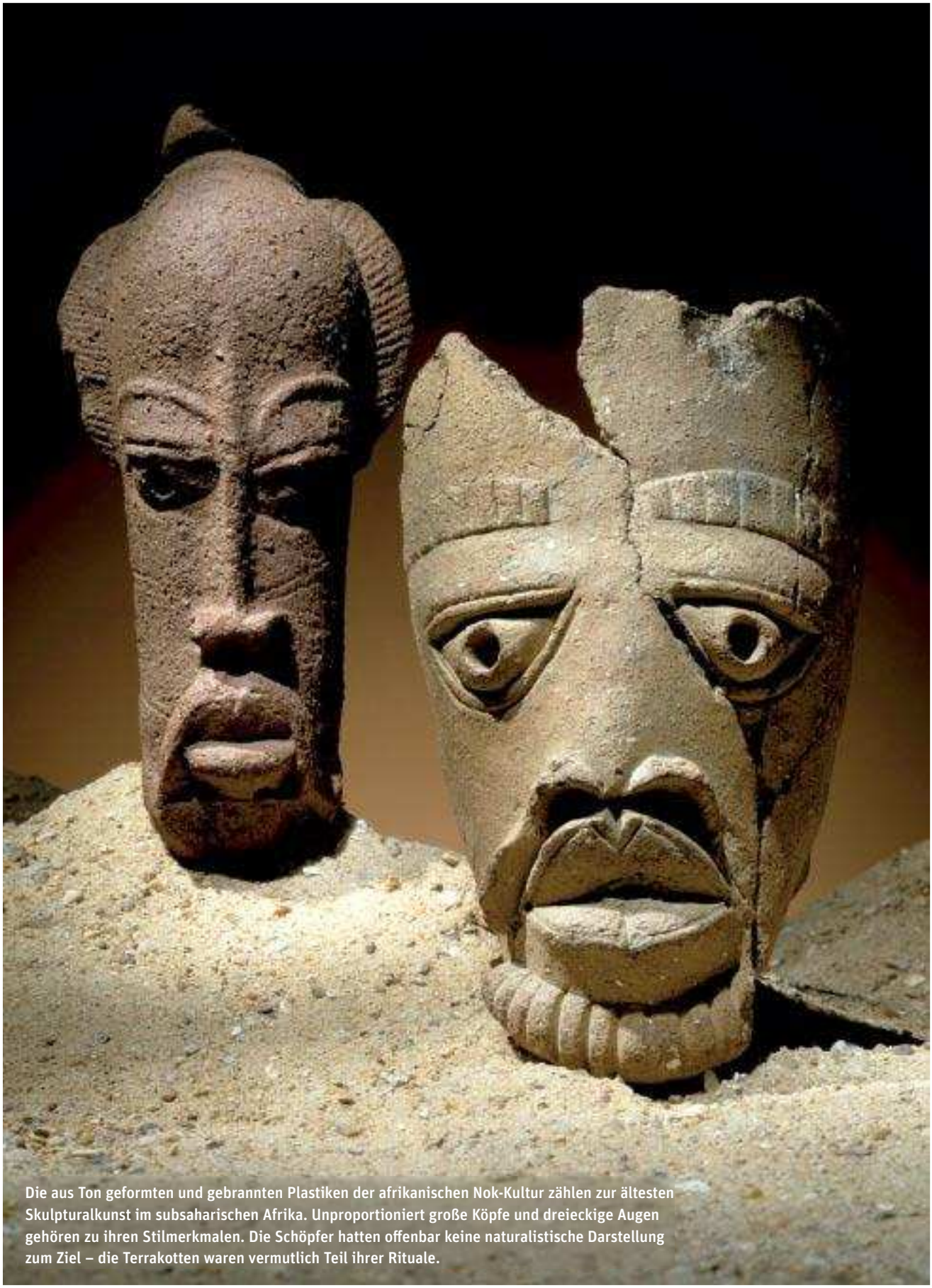
Vermutlich erwartete Fagg noch Funde anderer Art. Denn zu einer Kultur gehört mehr als das Hervorbringen von Kunst – die wäre nicht einmal erforderlich, um von einer Kultur zu sprechen. Doch tatsächlich blieben die Terrakotten lange das Markanteste, das auf jene Menschen der nigerianischen Prähistorie hinweist.

Wie lebten die Nok-Leute zusammen? Wovon ernährten sie sich? Bildhauerei – also das Erschaffen körperlich-räumlicher Gebilde, von ästhetischen Idealen geleitet, mittels eigens entwickelter, gut geübter Techniken umgesetzt – setzt keine sonderlich weit entwickelte Gesellschaft voraus. Urformen künstlerischer Betätigung, fast so alt wie der *Homo sapiens* selbst, wurden bereits im südlichen Afrika entdeckt: lineare Ritzmuster, 80 000 Jahre alt, Farbpigmente aus zerriebenen Steinen, doppelt so alt. Als der anatomisch moderne Mensch zehntausende Jahre später, vor etwas mehr als 30 000 Jahren, nach Europa einwanderte, seine Lebens- und Glaubenswelt an Höhlenwände malte und in Kleinplastiken aus Horn oder Knochen darstellte, lebte er nach wie vor in sehr kleinen, einfach organisierten Gruppen von Jägern und Sammlern.

Ein ausgereifter Stil allerdings spricht für eine schon lang entwickelte Technik, das strikte Befolgen ästhetischer Normen für einen ausdifferenzierten Glauben. Warum sonst entlehnten antike Bildhauer die Motive für ihre Statuen der Götterwelt? Ohne den Begriff genauer definieren zu wollen, können wir konstatieren: »Große« Kunst verlangt eine komplexe Gesellschaft, sie diente in der Mensch-

In Kürze

Die prächtigen Statuen der Nok-Kultur Nigerias sind mindestens etwa 2000 Jahre alt und gehören damit zu den **ältesten Plastiken südlich der Sahara**. Die meisten stammen leider aus Raubgrabungen, daher gibt es nur zu wenigen Exemplaren Angaben über Fundort und -zusammenhang. Nach Ansicht der Autoren spricht der **hohe Grad der Kunstfertigkeit** aber dafür, dass die Nok-Kultur den Anfang komplexer Gesellschaften in Westafrika markiert. Neuere Grabungen und Befunde zur Siedlungsdichte bestätigen diese Annahme.



Die aus Ton geformten und gebrannten Plastiken der afrikanischen Nok-Kultur zählen zur ältesten Skulpturalkunst im subsaharischen Afrika. Unproportioniert große Köpfe und dreieckige Augen gehören zu ihren Stilmerkmalen. Die Schöpfer hatten offenbar keine naturalistische Darstellung zum Ziel – die Terrakotten waren vermutlich Teil ihrer Rituale.

AKG BERLIN / NATIONALMUSEUM JOS, NIGERIA

Die Fertigung einer Nok-Kopie

Alle bislang entdeckten Nok-Plastiken, bis auf einige kleinere Exemplare, sind hohl. Als Werkstoff diente Ton, der Beimengungen von Feldspat, Quarz und Glimmer enthielt. Noch heute benutzen nigerianische Kunsthandwerker ein solches Gemisch, da es zum einen das Springen der Formen beim Brennen verhindert und zum anderen erlaubt, bei der relativ niedrigen Temperatur von 800 Grad Celsius zu brennen – schon zwei Stunden in einem offenen Feuer genügen. Zylindrische Formen wurden aus Tonwülsten aufgebaut, das verraten Bruchstellen. Details und Verzierungen hat man aufmodelliert, mitunter auch herausgeschnitzt.

Audu Washi, ein heute lebender Künstler, der Statuen im Nok-Stil für Abnehmer aus Togo und Niger fertigt, gab uns einen Einblick in sein Handwerk. Wichtig ist bereits der Ton, der von Bewohnern der Nok-Region an einem geheimen Ort gewonnen und beutelweise verkauft wird. Die glimmerartigen Partikel darin geben Imitaten den von den Originalen bekannten Glanz. Der Ton wird mit Feldspat und anderem vermengt, darunter auch gemahlenen Fragmenten echter Nok-Terrakotten, damit sie Originalen möglichst ähnlich sind.

Washi baut seine Kopien aus Tonwülsten auf, beginnend mit der Basis und den Beinen, dann dem Unterkörper. Er benutzt nur ein Werkzeug: einen an einem Ende schräg angeschnittenen Holzstab. Mit dessen Fläche glättet er den Ton, mit Kanten und der Spitze ritzt er Strukturen. Vor dem Brennen muss jede Figur gut trocknen. Um den hier abgebildeten »Philosophen« zu formen, benötigte er fünf Stunden.

FOTOS DIESER SEITE: PETER BREUNIG

Aus Tonwülsten und nur mit einem zugeschnittenen Holzstab formt ein nigerianischer Künstler die Kopie einer Nok-Plastik.

heitsgeschichte entweder religiösen Zwecken oder der Zurschaustellung von Macht.

Welten scheinen zwischen den Nok-Plastiken, gefertigt zwischen 500 v. Chr. und 200 n. Chr. (es gibt erste Hinweise auf ein noch älteres Datum), und den bis tausend Jahre älteren, an Spielzeug erinnernden Tonfigürchen von Rindern und Menschen zu liegen, die im Tschadbecken ausgegraben wurden (Gajiganna-Kultur, siehe Tabelle rechts unten). Für eine hochstehende Kultur spricht auch ihre Verbreitung: Nok-Terrakotten wurden in einem Gebiet von 100 000 Quadratkilometern entdeckt; das entspricht der Fläche Portugals.

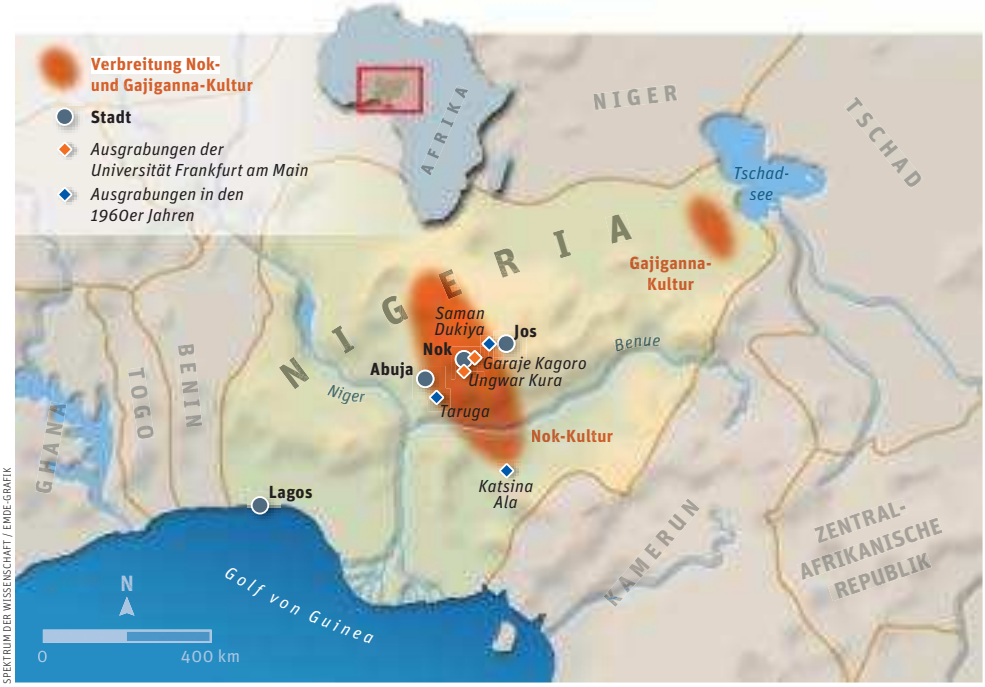
Augen in Form eines Dreiecks sind ein typisches Stilmerkmal. Aus Ton geformte Waffen und Schmuck, Haartrachten und Kopfbedeckungen, sogar Andeutungen von Krankheiten vermitteln ein Bild der Menschen und ihres Alltags. Weil dabei keine Figur der anderen gleicht, erscheinen sie trotz des einheitlichen Stils individuell. Einige Dargestellte wirken mit ihrer prächtigen Ausstattung wie hochrangige Würdenträger – und belegen soziale Unterschiede.

Solche Kunstwerke entstehen nicht nebenbei, sie setzen Fachkenntnisse und Erfahrung voraus. Das zeigt sich sogar heute noch. In Nigeria stellen einige Handwerker Nok-Terrakotten her. Jahre der Übung sind erforderlich, bis Stil und Ausdruck stimmten.

Keine brotlose Kunst

Es steht also außer Frage, dass die Plastiken das Werk von Spezialisten, besonders begabten Handwerkern oder – wie wir heute sagen würden – Künstlern sind. Auch wenn dies nicht ihre einzige Tätigkeit war, nach dem Motto »Morgens Bauer, nachmittags Künstler«, waren offenbar nicht mehr alle Angehörige des Volks ausschließlich mit dem Beschaffen oder der Produktion von Nahrung befasst, wie es bei Jägern und Sammlern oder einfachen bäuerlichen Gemeinschaften der Fall war. Vielmehr musste diese Gemeinschaft in der Lage gewesen sein, so viel Nahrung zu produzieren, dass einige Mitglieder die Zeit hatten, sich als Spezialisten in Sachen Kunst zu betätigen. Vermutlich tauschten sie ihre Werke gegen Nahrung oder wurden von ihren Auftraggebern versorgt. Diese wiederum waren im Allgemeinen Angehörige einer gesellschaftlichen Elite.

Als die ersten Terrakotta-Figuren vor einem halben Jahrhundert ans Licht kamen, dachte noch niemand an eine komplexe soziale Gemeinschaft als Urheber. Allenfalls stutzte man über den feinen Stil, der gar nicht so recht zu einer kleinbäuerlichen Welt oder gar zu steinzeitlichen Jägern passte. Dass die Figuren überhaupt entdeckt wurden, verdanken wir



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK

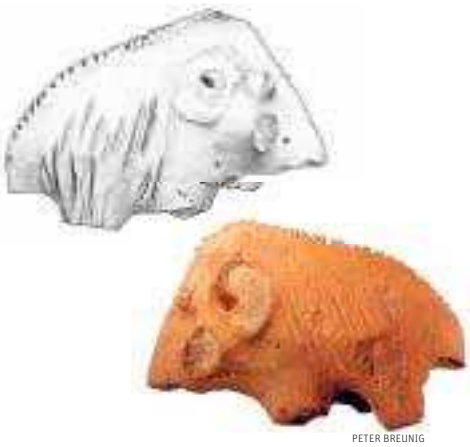
Nigeria ist das bevölkerungsreichste Land Afrikas. Etwa viermal so groß wie die Bundesrepublik, leben dort gut 140 Millionen Menschen. Bewaffnete Konflikte zwischen Ethnien belasten die junge Demokratie. Auch im Verbreitungsgebiet der prähistorischen Nok- und der noch älteren Gajiganna-Kultur gibt es Regionen, in denen ausländische Archäologen auf der Hut sein müssen.

dem damals noch lohnenden Abbau von Zinn im Tagebau – Minenarbeiter hatten sie gefunden. Bis zu acht Meter tief steckten die Terrakotten im Boden. Waren sie einst von reißenden Flüssen während der Regenzeit dorthin gespült oder mit Absicht dort deponiert worden? Auch das gehört zu den ungelösten Rätseln um die Nok-Kultur.

Die erste Plastik, gut zehn Zentimeter hoch, fand Dent Young, Miteigentümer einer Bergbaugesellschaft, 1928 nahe dem Dorf Nok. Er übergab sie dem Bergbauamt in der Stadt Jos. Erst 15 Jahre später kam in einer anderen Mine die nächste Figur ans Licht: ein Menschenkopf, der zunächst »Karriere« als Vogelscheuche machte, dann aber doch seinen Weg nach Jos fand. Dort wurde Bernard Fagg auf die Nok-Plastiken aufmerksam, der damals in der britischen Kolonialverwaltung als Archäologe tätig war.

Ihm verdanken wir die systematische Sammlung der Zufallsfunde aus den Minen. Als im Tarugatal, etwa hundert Kilometer südwestlich von Nok, zwei Plastiken entdeckt wurden, unternahm er die erste Ausgrabung. In vier Kampagnen von 1960 (dem Jahr der Unabhängigkeit Nigerias) bis 1969 entdeckte er neben wenigen Bruchstücken von Terrakotten vor allem zahlreiche Überreste von Eisenschmelzöfen – wahrscheinlich verstanden die Nok-Leute mithin als Erste südlich der Sahara, dieses Metall herzustellen. Faggs Tochter Angela, ebenfalls Archäologin, unternahm eine Grabung bei Samun Dukiya, unweit vom Ort Nok. Am Fuß von Felswänden untersuchte sie den Müll einer Nok-Siedlung, die wohl auf den Felsen errichtet worden war: Terrakotta-Bruchstücke, Topfscherben, eiserne Haken und anderes mehr. Schließlich forschte ihr Kollege und Landsmann Robert Soper Ende der 1960er Jahre in Katsina Ala, das südlich des Zinnabbaugebiets liegt; er hat seine Ergebnisse aber nie publiziert.

Danach erfolgte die Erforschung der Nok-Kultur anhand der bekannten Terrakotten. Stilvergleiche wurden angestellt, über deren Zweck gerätselt. 1981 beispielsweise diskutierte der britische Archäologe Thurstan Shaw in »Spektrum der Wissenschaft« mögliche Funktionen der Terrakotten: Giebelschutz der Strohhütten, im kultischen Kontext die Darstellung übernatürlicher Wesen, etwa zur Be-



PETER BREUNIG

Vor etwa 2300 Jahren, also fast zeitgleich zur Nok-Kultur, entstand diese Elefantendarstellung in der Gajiganna-Kultur.

Name	Zeit	Lage	Kunst	sonstige Besonderheiten
Gajiganna	1800 – 500 v. Chr.	Tschadbecken, Nordostnigeria	einfache Tonfiguren von Mensch und Tier	ab etwa 500 v. Chr. befestigte Siedlungen
Nok-Kultur	500 v. Chr. – 200 n. Chr.	Zentralnigeria	Menschen- und Tierdarstellungen in Terrakotta	
Ife	um 1000 – um 1500	Südwestnigeria	naturalistisch wirkende Tier- und Menschenköpfe aus Metall oder Ton	der Stadtstaat Ife war mit Erdwällen befestigt; das Volk der heute dort lebenden Yoruba halten Ife für den Ort der Erschaffung der Welt
Igbo-Ukwu	um 1000	Ostnigeria	meisterhafte Darstellungen von Menschen und Tieren im Bronzeguss	Tausende von Glasperlen verweisen auf eine Teilnahme am Fernhandel, wahrscheinlich mit Ägypten, und damit auf großen Wohlstand
Cross River State	vermutlich ab 1500	Ostnigeria, im Gebiet des Flusses Cross	Reliefs von Gottheiten oder Ahnen in 295 Natursteine gehauen, die bis zu zwei Meter hoch sind	vermutlich von den Vorfahren der heute dort lebenden Ekoi geschaffen

SCALA, FLORENZ / NATIONALMUSEUM JOS, NIGERIA

Auch Tierfiguren (hier ein Elefantenkopf) fertigten die Nok-Künstler mit den typischen Augen in Form eines Dreiecks.

schwörung guter Ernten oder zur Heilung von Krankheit (Spektrum der Wissenschaft 4/1981, S. 44).

Das Traurige ist: Seitdem kam die Forschung kaum weiter. Es gibt nur wenige einheimische Archäologen, und deren Budgets lassen Ausgrabungen kaum zu. Ausländischen Forschern bietet Nigeria zwar die Chance, Neuland zu betreten, doch das Terrain ist schwierig, ja gefährlich. Seit dem Ende der Kolonialherrschaft 1960 übernahm das Militär dreimal die Macht, die Lage gilt in einigen Landesteilen nach wie vor als instabil (Informationen dazu gibt das Auswärtige Amt der Bundesrepublik). Man benötigt gute Kontakte zu Regierungsstellen, aber auch zur Bevölkerung, denn letztlich ist sie es, die Hinweise auf mögliche Fundstellen liefert.

Als wir uns 2005 erstmals mit der Nok-Kultur befassten, konnten wir dieses Pfund in die Waagschale werfen, denn wir graben bereits seit gut 20 Jahren im Tschadbecken Nigerias. Mit der dort untersuchten prähistorischen Gesellschaft wollten wir die der Nok vergleichen.

Welche Konsequenzen der Rückzug der Archäologen hatte, zeigte sich schnell und erschreckend: Raubgräber hatten das lukrative Feld beackert, denn auf dem internationalen Kunstmarkt erzielen Nok-Terrakotten Spitzenpreise von einigen tausend bis zu 100 000 Dollar. Wenn es stimmt, was uns Insider erzählten, gelangten hunderte oder gar tausende Statuen außer Landes. Mögen auch manche letztlich von Museen erworben und so der Forschung zugänglich sein – ohne die Dokumentation des Fundzusammenhangs ist solche Arbeit immer nur Stückwerk.

Gemeinsam mit unserem Kollegen James Ameje von der nigerianischen Bundesbehörde für Museen und Kulturgüter sowie mit Auszubildenden dieser Einrichtung und unserem Kooperationspartner Joseph Jemkur von der Universität in Jos versuchen wir uns durch Grabungen und Prospektionen einen Überblick zu verschaffen. Ohne die Hilfe unseres Vorarbeiters Umaro Potiskum, dessen Vater schon Bernard Fagg unterstützt hatte, wären wir sicher noch nicht so weit gekommen. Er kennt die Organisation der Raubgräber, weiß, wo sie arbeiten; außerdem stellt er die Kontakte zu den Bewohnern der Dörfer her, informiert uns über neue Zufallsfunde.

Entdeckung auf dem Platz der Hyäne

Eine Zwischenbilanz lautet: Nirgendwo im subsaharischen Raum und unseres Wissens auch in keiner anderen Kultur jener Zeit – etwa bei den Kelten Europas – produzierte eine prähistorische Gemeinschaft solche Mengen an kunstvollen und offenbar einem durchgängigen Schema folgenden Tonfiguren. Wir bargen sie aus kleinen Stätten an Berghängen, vielleicht einstigen Gehöften, und entdeckten sie auf etlichen Hektar großen Plätzen in der Ebene oder auf Hügelkuppen, wahrscheinlich früheren Siedlungen. Zu Letzteren gehört Ungwar Kura, der »Platz der Hyäne«. Allein bei einer 25 Quadratmeter großen Testgrabung bargen wir im Jahr 2007 gut 300 Terrakotta-Bruchstücke. Sie lagen zwischen Keramikscherben, Mahlsteinen, Steinbeilen, Holzkohleresten und anderen Spuren des Alltags.

Dieses Beieinander von Kunst und Alltag verblüfft im ersten Moment. Wer würde sich einen Picasso ins Bad hängen, eine Rodin-Plastik neben den Herd stellen? Doch dies wird der Zeit nicht gerecht. In traditionellen afrikanischen Gesellschaften diente gestalterisches Schaffen nicht der Verschönerung von Siedlungen, nicht der Erbauung ihrer Bewohner, sondern immer einem Zweck. Welchem jedoch, darüber wird im Fall der Nok-Kultur seit Jahrzehnten gerätselt.

Im Frühjahr dieses Jahres kamen wir durch einen Zufall der Lösung einen großen Schritt näher: Im Dorf Garaje Kagoro stießen Angehörige einer Verstorbenen beim Anlegen des Grabs in etwa zwei Meter Tiefe auf eine zerbrochene Terrakotta. Der Beschreibung des Funds nach zu urteilen lagen die Stücke auf einem Pflaster aus faustgroßen Steinen – eine aufregende Entdeckung, die einen Hinweis auf den Zweck der Figuren versprach. Die Stelle lag im Hof des Anwesens der Toten. Am liebsten hätten wir ihn gründlich umgegraben, doch das war nicht möglich, denn dort befanden sich bereits einige Gräber. Doch erneut kam uns der Zufall, der in der Archäologie eine große Rolle spielt, zur Hilfe. Je-

Ohne einen guten Kontakt zu den Dorfbewohnern im Untersuchungsgebiet lässt sich in Afrika keine Archäologie betreiben. Denn oft ist es der Zufall, der eine neue Fundstätte erschließt. Beispielsweise, wenn Bauern beim Bearbeiten ihrer Felder auf eine Nok-Terrakotta stoßen.

PETER BREUNIG

mand berichtete uns, etwa 300 Meter entfernt, mitten auf der Dorfstraße, würden ganz ähnliche Stücke gebrannten Tons aus dem Boden schauen. Als wir uns das ansahen, war schnell klar: Auch dort war ein Tongefäß vergraben. Daneben lugten faustgroße Steine aus der Erde.

Das vermeintliche Behältnis entpuppte sich als der gut erhaltene Kopf einer Statue mit interessanten Details, wie zum Beispiel einer von den Mundwinkeln ausgehenden Narbentätowierung. Kopfbedeckung oder Haartracht fehlten, sie waren längst dem Verkehr auf der Dorfstraße zum Opfer gefallen. Der Körper lag in Stücken, war aber weit gehend vollständig. Auch das tönerne Abbild einer Halskette mit Muscheln hatte sich erhalten, ebenso ein Narbenschmuck der weiblichen

Interview mit Peter Breunig

Afrika – Schwarzer Kontinent mit weißen Flecken

MIT FRDL. GEN. VON PETER BREUNIG

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Breunig, Nigeria ist zumindest in einigen Gebieten für Ausländer kein sicheres Terrain. Wie schützen Sie sich und Ihre Mitarbeiter?

Peter Breunig: Tatsächlich sind wir schon mehrfach ausgeraubt worden. Am schlimmsten war ein nächtlicher Überfall im Tschadbecken, wo wir unser Feldcamp neben der Ausgrabung aufgeschlagen hatten. Aber aus solchen Fehlern lernt man. Nachts sind wir nur noch in festen Häusern, bewacht von Sicherheitsleuten. Zudem informieren wir die örtliche Polizei über alle Vorhaben. Ganz wichtig ist auch der gute Draht zur Bevölkerung, denn die weiß, wo sich bewaffnete Banden herumtreiben. Und dann gibt es noch die nigerianische Tochter des Bau- und Dienstleistungskonzerns Bilfinger und Berger. Die arbeitet im Süden, in den Ölgebieten, wo man als Weißer besser überhaupt keinen Schritt ohne bewaffneten Schutz unternimmt. Wenn sich jemand in Sicherheitsfragen auskennt, dann die. Außerdem haben sie gute Kontakte zu Regierungskreisen.

Spektrum: Wie begegnen Ihnen die Menschen in Ihrem Untersuchungsgebiet?

Breunig: Meist sehr freundlich und hilfsbereit, vom Dorfchef bis zum traditionell auch unter der demokratischen Regierung noch im Nok-Gebiet amtierenden König. Sie unterstützen uns, sobald wir sie überzeugt haben, dass wir keine Händler sind. Dafür braucht man manchmal etwas Geduld.

Spektrum: Interessieren sie sich auch für Ihre Arbeit?

Breunig: Sogar sehr. Archäologen bringen Wissen über Nigerias frühe Geschichte, über eine Zeit jenseits der mündlichen Überlieferung. Das verschafft uns Ansehen. Als wir 1998 bei Grabungen im Tschadbecken das mit 8000 Jahren älteste Boot Afrikas entdeckten, wurden wir landesweit bekannt.

Spektrum: Sie berichten, dass Raubgräber nach wie vor Nok-Stätten plündern.

Breunig: Es gibt zwar Gesetze dagegen, doch der Profit ist offenbar hoch, mancher Zollbeamte leicht zu überzeugen, die Nachbarn Togo und Benin haben kein Ausfuhrverbot und sind schnell über die grüne Grenze zu erreichen. Ich habe gehört, dass sich der Kunstmarkt zurzeit etwas zurückhält, doch nicht aus Einsicht, sondern weil sehr gut gemachte Fälschungen aufgetaucht sind.

Spektrum: Eigentlich stehen Sie in Konkurrenz zu den Raubgräbern. Gab es schon einmal Probleme?

Breunig: Bislang noch nicht. Wir haben sogar das Vertrauen eines »Ehemaligen« gewonnen. Vermutlich hält er uns für Kollegen, die sich furchtbar ungeschickt anstellen. Als das Geschäft noch gut lief, erzählte er einmal, beschäftigte er auf einer Nok-Fundstelle einige hundert Arbeiter. Wir können uns kaum mehr als 20 leisten und verplempern in den Augen der »Profis« Zeit mit dem Vermessen und Zeichnen jeder Scherbe.

Spektrum: Wie erfahren Sie von Fundstellen?

Breunig: Die meisten liegen in entlegenen Gegenden. Ein Hirte, der mit seinem Vieh durch den Busch streift, ein Bauer auf seinem Feld. Sie sehen eine Scherbe, die der Regen frei gespült hat, und erzählen davon im Dorf. Dann gibt es andere, die uns diese Informationen zutragen. Als wir im vergangenen Jahr in einer französischen Zeitschrift über unsere Funde im Dorf Ungwar Kura berichteten, lud uns der Chef des Nachbarorts Ramindop ein, auf seinem Territorium weiterzuforschen. Bis dahin halten seine Leute die Augen offen.

Spektrum: Zeitgleich zur Nok-Kultur entwickelten sich in Mitteleuropa die Kelten. Wie unterscheidet sich Ihre Arbeit von der eines Frühgeschichtlers hier zu Lande?

Breunig: (lacht) Seit diesem Jahr eigentlich kaum, denn dank eines Sponsors haben wir jetzt eine Solaranlage und damit Strom. Im Ernst: Jede Grabungskampagne ist eine logistische Herausforderung. Das fängt schon bei dem Fehlen vernünftiger Karten an. Wir müssen trübes Wasser aus Brunnen aufbereiten, bei mehr als 40 Grad arbeiten und uns in einer Kultur zurechtfinden, die einem Europäer auch nach 20 Jahren noch fremd bleibt. Das ist natürlich ein bisschen Abenteuer, das hat den Reiz der Exotik. Der Hauptgrund, warum wir diese Strapazen auf uns nehmen, ist aber der: Für den Archäologen ist Afrika immer noch so etwas wie ein weißer Fleck in der Karte der Menschheitsgeschichte. Und damit eine Herausforderung.

Das Interview führte ***Klaus-Dieter Linsmeier***.

FOTOS DIESER SEITE: PETER BREUNIG

Nur handgroß ist dieser aus Ton geformte Kopf – doch selbst so kleine Figuren zeigen typische Stilmerkmale.

Brüste, vielleicht eine Art von Stammesmarken. Zwischen den Stücken lagen Steine, anscheinend unbearbeitet, doch viele mit einer auffällig löchrigen Oberfläche. Es ist denkbar, dass dies eine Rolle spielte.

Die Ausgrabung umfasste schließlich 50 Quadratmeter und erstreckte sich quer über die Dorfstraße – natürlich mit Zustimmung aller Betroffenen. Acht weitere Stellen wurden entdeckt, eine neben der anderen, in etwa zwei Meter Abstand voneinander (Bild unten). Und stets bot sich das gleiche Bild: zerbrochene Terrakotten – mitunter existierten nur noch wenige Reste – und Steine; in einem Fall waren nur noch Steine vorhanden. Im Übrigen entdeckten wir aber weder Scherben von Gebrauchskeramik noch Mahlsteine oder Knochen oder sonst für Siedlungen typische Funde.

Gleich, ob die Terrakotten vor mehr als 2000 Jahren auf den Steinen standen, von ihnen gestützt wurden oder damit zertrümmert worden waren, ob sie Götter oder Verstorbene darstellten: An ihrer rituellen Deponierung und dem kultischen Charakter des Platzes besteht nun kein Zweifel mehr.

Welche Rolle die Fläche einst gespielt haben muss, lässt schon die große Zahl der Terrakotten erahnen. Noch wissen wir nicht, in welchem Zusammenhang die zu Anfang entdeckte, 300 Meter entfernt vergrabene Figur zu denen in der Dorfstraße steht. Denkbar wäre, dass sie alle zu einem gemeinsamen Ritualplatz entsprechender Dimension gehören. Dann würden allein in Garaje Kagoro mehr Terrakotten auf ihre Ausgrabung warten, als der Wissenschaft bislang insgesamt bekannt sind. Das klingt vielleicht spekulativ, zeigt aber, welches Potenzial in der Erforschung der Nok-Kultur noch schlummert.

Elaborierte rituelle Praktiken, eine ausgefeilte Kunst und spezialisierte Künstler entstehen nicht in Gruppen von Jägern und Sammlern oder in kleinen bäuerlichen Dorfgemeinschaften. Eine Population muss sozusagen eine gewisse Größe erreichen, um sich so stark auszudifferenzieren. Erst das Zusammenleben vieler Menschen oder die Interaktion einer großen Zahl benachbarter Gemeinschaften führten zu komplexen Organisationsformen.

Tausend mögliche Fundplätze

Dass im Nok-Gebiet die kritische Masse erreicht wurde, lässt allein die schiere Zahl der inzwischen von uns entdeckten Fundstellen vermuten. Dazu gehören zahlreiche große Plätze, die sich jeweils über eine Fläche bis zu zehn Hektar erstrecken. Zwar haben Raubgräber sie regelrecht durchlöchert, doch Nachgrabungen an unberührten Flächen bestätigten die geschätzte Ausdehnung. Zudem führten uns Einheimische zu weiteren, noch unberührten Stellen. Mitunter stoßen Bauern bei der Feldarbeit auf Teile von Terrakotten (siehe Bild S. 68), Testgrabungen belegten in all diesen Fällen die dichte Verteilung von Fundmaterial über mehrere Hektar. Inzwischen scheint es nicht vermessen, im Verbreitungsgebiet der Nok-Kultur mit hunderten, wenn nicht tausenden möglichen Fundplätzen zu rechnen. Auch wenn nicht alle aus der gleichen Zeit stammen, auch wenn wir bei einigen noch nicht sicher sagen können, ob sie Ortschaften oder Kultstätten waren, gehen wir inzwischen von einer hohen Bevölkerungszahl und einem organisierten Siedlungswesen aus. Betrachtet man die Terrakotten unter dem Aspekt des Austauschs von Waren und Ideen, spricht ihre stilistische Einheitlichkeit auf einer Fläche von 100 000 Quadratkilometern für einen von Regeln bestimmten Kontakt zwischen den Niederlassungen.

Haben sich diese allmählich selbst herauskristallisiert, durch die Praxis von Generation zu Generation entwickelt, oder gab es eine »politische« Instanz, die über sie entschied? Produktion und Verteilung von Nahrung und anderen Ressourcen mussten bei einer großen Bevölkerung organisiert werden. Wahrscheinlich galt es von Zeit zu Zeit, Streitfälle in den Siedlungen zu entscheiden. Möglicherweise drohten Angriffe anderer Gruppen, gegen die man gerüstet sein musste; dazu bedurfte es eines Anführers. Auch Religion und Kult lagen vermutlich in den Händen ausgewählter Personen, um die Gemeinschaft gegenüber Göttern, Geistern oder Ahnen zu repräsentieren. Als Folge davon bildete sich eine Füh-

Mitten in der Dorfstraße von Garaje Kagoro entdeckten die Archäologen zertrümmerte Tonfiguren der Nok-Kultur, eine neben der anderen. Ganz offensichtlich waren sie im Zuge eines Rituals vor mehr als 2000 Jahren dort niedergelegt worden.

rungsschicht heraus, an deren Spitze Häuptlinge, Fürsten oder gar Könige standen, darunter Berater und Verwalter, Heerführer und Krieger, Priester und andere mit besonderer Funktion. Das alles ist plausibel – bleibt jedoch Spekulation. Die Existenz einer Nok-Elite ist wahrscheinlich, über ihre »Feinstruktur« aber wissen wir nichts. Weder kennen wir ein Fürstengrab noch gibt es Hinweise auf Streitkräfte.

Falls es eine Elite gab, so legitimierte sie ihre Position sicherlich teilweise auch durch den Wohlstand des Gemeinwesens. Doch bislang war die Nok-Kultur in dieser Hinsicht ein unbeschriebenes Blatt. Außer der Eisenherstellung deutete nichts auf ihre Wirtschaft hin. Was die Menschen gegessen haben, war unbekannt. Deshalb suchten wir bei unseren Grabungen von Anfang an nach Nahrungsresten. Die Methoden der Archäologie sind in den letzten Jahrzehnten sehr viel genauer und vielfältiger geworden. Nok-Fundschichten sind oft regelrecht von verkohlten Pflanzenresten durchsetzt. Raubgräber profitieren beispielsweise davon, dass Holzkohle geradezu ein Hinweis auf Terrakotten ist – vielleicht gehörten Feuer zum Ritual bei der Deponierung.

Für uns ist es viel wichtiger, dass die vergänglichen organischen Substanzen durch das Verkohlen in ihrer Struktur konserviert wurden. Archäobotaniker identifizierten bereits Körner der Perlhirse *(Pennisetum glaucum)* in solcher Zahl, dass von einem intensiven Anbau und einem entwickelten agrarischen Wirtschaftssystem ausgegangen werden kann. Im Gebiet der Nok-Kultur sind dies die frühesten Belege für eine Nahrungsproduktion. Überraschend ist allerdings, dass dieses Getreide in der Sahelzone beheimatet ist. Im frühen 1. Jahrtausend v. Chr., also zu Beginn der Nok-Kultur, herrschte in Westafrika ein trockenes Klima. Fruchtbares Land verdorrte, und der Regenwald zog sich in Richtung Süden zurück (Spektrum der Wissenschaft 5/2008, S. 70). Es ist denkbar, dass die Perlhirse im Zuge dieser Veränderung zu den Nok-Leuten gelangte.

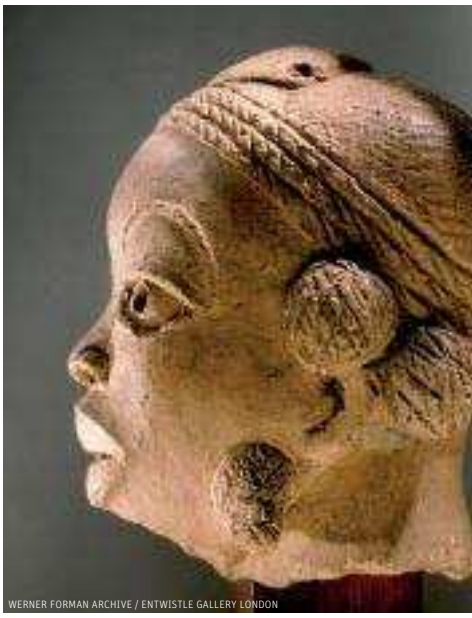
Welches Ausmaß das Wirtschaftssystem hatte, lässt sich anhand der wenigen »Stichproben« nicht schlüssig sagen. Doch es gibt indirekte Hinweise: Um Felder anzulegen, musste Wald gerodet werden. Wir wissen heute nur zu gut, welche Folgen das haben kann. Regen spült den frei liegenden Boden davon und verfrachtet ihn in Senken und Täler der Umgebung. Im Moment untersuchen wir deshalb, ob sich solche Prozesse für die Zeit der Nok-Kultur nachweisen lassen. Geowissenschaftler haben durch Bohrungen Bodenprofile gewonnen. Der erste Schritt, eine sprunghaft angewachsene Sedimentationsrate nachzuweisen, wäre eine Datierung der Bohrkerne, doch bislang wurde in den Profilen nichts Geeignetes entdeckt. Ohnehin kann ein solcher Landschaftsbefund auch eine andere Ursache haben. Abgeholzt wurde sicher auch für die bereits von Bernard Fagg nachgewiesene Eisenerzverhüttung, sie verbraucht große Mengen an Holzkohle. Auch bei unseren Ausgrabungen kamen Eisenfunde zu Tage, darunter erstmals Produkte aus dem damals sicher sehr wertvollen Metall: Beilklingen und Ringe (siehe Bild S. 72).

Das überraschend hohe Alter der Eisenmetallurgie konnten wir bestätigen: Schon vor 500 v. Chr. verstanden sich die Handwerker der Nok-Kultur auf das Verhütten. Waren sie vielleicht sogar die »Erfinder« dieser Technologie? Anders als in Europa ging dem Eisen in Afrika kaum Bronze- oder Kupfermetallurgie voraus. Lediglich in Niger und in Mauretanien existierte im frühen 1. Jahrtausend v. Chr. eine lokal begrenzte Verarbeitung von Kupfer. Deshalb schien ein Knowhow-Import naheliegend, wobei das phönizische Karthago und das nubische Königreich von Meroë als Wissensquelle in der Diskussion waren. Sollten sich aber die frühen Datierungen für das Eisen der Nok-Kultur erhärten, scheint auch eine eigenständige Entwicklung der Metallurgie südlich der Sahara wahrscheinlich. Als Rohstoffquelle könnte Laterit gedient haben, ein eisenhaltiges Verwitterungsgestein, das in tropischen Regionen auftritt: Starke Regenfälle und hohe Temperaturen lassen Gestein rasch verwittern, leicht lösliche Minerale werden fortgeschwemmt, während sich Eisen anreichert (das aluminiumhaltige Bauxit entsteht auf die gleiche Weise).

Aufbruch aus der Steinzeit

Es ist sicher zu früh, um aus den wenigen Funden mehr als die bloße Existenz der Eisenmetallurgie und ihre Datierung ableiten zu können. Doch man stelle sich vor, welche Möglichkeiten diese neue Technologie den Nok-Leuten gab. Bis dahin hatten sie in der Steinzeit gelebt! Vielleicht fertigten sie aus dem neuen Werkstoff bereits Hacken, mit denen sich der Boden ihrer Felder besser bearbeiten ließ als mit einem Grabstock oder einer Hacke mit Steinklinge. Die Produktivität der Felder könnte gestiegen, Überschüsse könnten erwirtschaftet worden sein. Und das bedeutete in der Menschheitsgeschichte auch stets: Bevölkerungswachstum und Macht. Möglicherweise erklärt die Erfindung oder Ankunft der Eisentechnologie die plötzliche Entfaltung der Nok-Kultur einschließlich ihrer Kunst.

Denn zu ihren Rätseln gehört auch, dass sie mit allen ihren Merkmalen geradezu vom



WERNER FORMAN ARCHIVE / ENTWISTLE GALLERY LONDON

Frisur und Schmuck zeichnen einige der Nok-Terrakotten als Angehörige einer Elite aus.

BRIDGEMAN BERLIN

Als eine der ersten Kulturen südlich der Sahara verstanden es die Nok-Leute, Eisenerz zu verhütten, wie Überreste entsprechender Werkstätten und ihrer Produkte, hier ein Ring, beweisen.

Himmel gefallen zu sein scheint. Was ging ihr voraus? Ein Blick in das einige hundert Kilometer entfernte Tschadbecken Nordostnigerias kann zwar keine Antworten, wohl aber Hinweise liefern. Im 2. Jahrtausend v. Chr. zwang das zunehmend trockenere Klima Nomaden aus dem Raum der südlichen Sahara mit ihren Rindern in die Savannen Westafrikas. Sie wurden dort sesshaft und siedelten in kleinen Dörfern oder Weilern. Zerfallene Lehmziegel ihrer Häuser und Siedlungsabfall bildeten im Lauf der Jahrhunderte Hügel, die im flachen Tschadbecken noch heute leicht auszumachen sind. In manchen Gegenden reihte sich offenbar ein Dorf an das andere. Auch in dieser älteren Kultur Nigerias – nach dem ersten Fundort Gajiganna genannt – war es die Perlhirse, die eine solche Bevölkerungsdichte ermöglichte, wie wir durch unsere Grabungen ermittelt haben.

Doch die Trockenheit hielt an, verschlimmerte sich sogar noch. Klimaforscher und Geoarchäologen machen eine globale Abkühlung dafür verantwortlich (Spektrum der Wissenschaft 5/2008, S. 70). Im Tschadbecken wie in anderen Gebieten Westafrikas gaben die Bauern offenbar die Sesshaftigkeit wieder auf, denn es entstanden keine neuen Siedlungshügel mehr, Fundstellen jener Zeit sind klein und arm an Funden.

Vermutlich ging auch der Nok-Kultur eine bäuerliche Phase voraus, lässt sich jedoch schwer nachweisen. Denn während das Tschadbecken in der vegetationsärmeren Sahelzone liegt, gedeiht im Nok-Verbreitungsgebiet eine dichte Baumsavanne. Die Krise lösten die Nok-Leute aber offenbar nicht durch eine Rückkehr zur nomadischen oder halb nomadischen Lebensweise, sondern durch die Eisentechnologie und eine gesellschaftliche Differenzierung, mithin einer Optimierung aller Ressourcen.

Vielleicht haben die entfernten Nachbarn im Tschadbecken davon Kenntnis gehabt, denn etwa um 500 v. Chr. ändert sich auch dort das archäologische Bild. Zwar fehlen darin Metallurgie und große Kunst, doch es entstanden weitläufige Siedlungen, die sich über fast 30 Hektar erstrecken, erkennbar an der hohen Dichte von Kleinfunden wie Scherben, Knochen und Steingeräten. Hunderte, wenn nicht tausende Menschen lebten dort. Wir vermuten, dass Probleme aufgetaucht waren, die nur eine große Gemeinschaft zu lösen vermochte. Vielleicht wurden die Ressourcen knapp, und es herrschten unruhige Zeiten. Carlos Magnavita, Archäologe in unserem Team, hat einige der großen Fundstellen mittels Magnetometrie »durchleuchtet«, das heißt anhand physikalischer Eigenschaften die Struktur der oberen Bodenschicht untersucht. Demnach waren Siedlungen aus der Zeit von etwa 500 v. bis 500 n. Chr. in einigen – nicht in allen – Gegenden des Tschadbeckens mit einem Graben umgeben worden, bis zu sechs Meter breit und drei Meter tief. Das beim Ausheben anfallende Erdreich hätte ausgereicht, Lehmmauern von einem Meter Dicke und drei Meter Höhe zu errichten. Offenbar wollte man sich schützen. Vielleicht war dieses Bedürfnis auch bei der Nok-Kultur vorhanden, denn einige ihrer Orte lagen auf schwer zugänglichen Hügelkuppen.

Eine prähistorische Welt im Umbruch

So unterschiedlich die Entwicklungen im Tschadbecken und im Nok-Gebiet im Einzelnen auch sein mögen, im Ganzen betrachtet gehören sie derselben Welt an – einer Welt im Umbruch, geprägt vom Anwachsen der Bevölkerung, dem Aufkommen effizienter Nahrungsproduktion und gesellschaftlicher Differenzierung. Diesem Umbruch folgte, vielleicht sogar von ihm ausgelöst, eine Zeit der Veränderungen auf dem ganzen Kontinent. In den ersten drei Jahrhunderten n. Chr. gelangten Metallurgie und Landwirtschaft bis in den Süden Afrikas. Auch die Ausbreitung der Bantusprachen, deren Urheimat im Gebiet östlich der Nok-Kultur, im nigerianisch-kamerunischen Grasland vermutet wird, oder das erstmalige Auftreten keramischer Gefäße im zentralafrikanischen Regenwald und den Savannen südlich davon gehören zu den Zeichen der kulturellen Umgestaltung.

Letztlich dürften darin auch die Wurzeln der frühen Reiche Westafrikas liegen – Ghana, Mali, Kanem-Bornu und Ife –, die am Ende des 1. Jahrtausends n. Chr. aufkamen, also etwa 3000 Jahre nach den ersten Bauern. Mitteleuropa hat sich dafür doppelt so lange Zeit gelassen. Solche Erkenntnis sollte helfen, stereotype Vorstellungen von der Rückständigkeit Afrikas zu korrigieren. Welche Rolle die Nok-Kultur beim Aufbruch in die neue Zeit gespielt hat, wollen wir in den nächsten Jahren mit einem Team aus Archäologen, Archäobotanikern, Geografen, Mineralogen, Geochemikern und Metallexperten untersuchen. Wir werden Siedlungen erstmals vollständig ausgraben, unsere Prospektion ausdehnen, die Landschaft stärker miteinbeziehen. Woher kam diese Kultur, die sich in ihrer Blütezeit über ein Gebiet von der Größe Portugals ausbreitete? Welche Rolle spielte die Eisenmetallurgie, welche Bedeutung hatte ihre Terrakotta-Kunst? Wie wirkte die Nok-Kultur über ihre Grenzen hinaus? Eigentlich genug Fragen für eine ganze Forschergeneration, doch ob so viel Zeit bleibt? Die Begierden der Raubgräber sind ungebrochen. ◁

Peter Breunig ist Professor für prähistorische Archäologie Afrikas am Institut für Archäologische Wissenschaften der Johann Wolfgang-Goethe Universität Frankfurt. **Nicole Rupp** hat über ein geoarchäologisches Thema im Tschadbecken promoviert. Sie ist wissenschaftliche Mitarbeiter in im Nok-Projekt und leitet die Feldarbeiten in Nigeria.

Breunig, P. et al.: Early Sculptural Traditions in West Africa: New Evidence from the Chad Basin of North-Eastern Nigeria. In: Antiquity 82(316), S. 423 – 437, 2008.

Breunig, P., Ameje, J.: The Making of »Nok Terracotta«. In: Afrique: Archéologie & Arts 4, S. 91 – 102, 2006.

Rupp, N. et al.: New Studies on the Nok Culture of Central Nigeria. In: Journal of African Archaeology 3(2), S. 283 – 290, 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957495.

Ein Denker ZWISCHEN ZWEI KULTUREN

Bernulf Kanitscheider ist ein Geisteswissenschaftler, dessen Interesse dem Weltbild der Naturwissenschaft gilt. Aus den Erkenntnissen der empirischen Forschung zieht er begriffliche Konsequenzen für naturphilosophische und wissenschaftstheoretische Probleme, aber auch für Ethik, Moral und individuelle Glückssuche.

In seinem Arbeitszimmer im Zentrum für Philosophie und Grundlagen der Wissenschaft an der Universität Gießen stellt sich Kanitscheider den Fragen Michael Springers.

Von Michael Springer

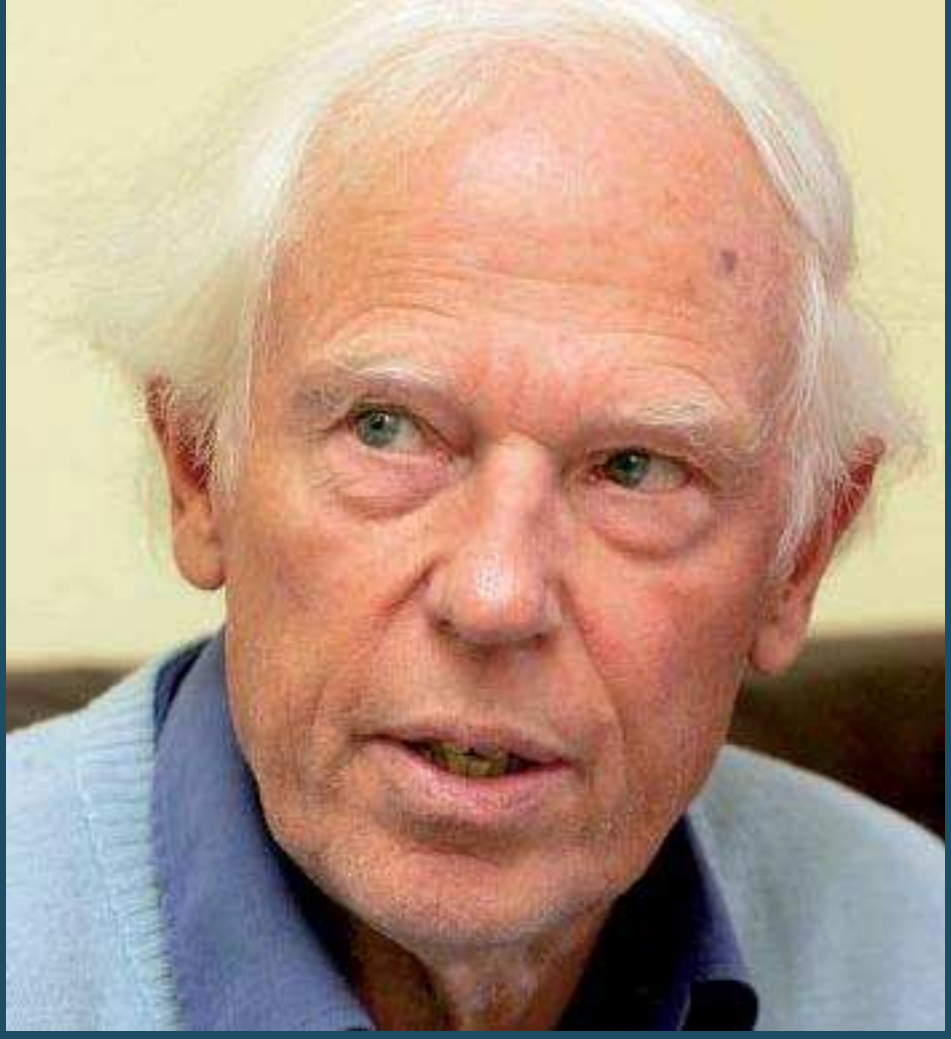
Als junger Mensch habe wohl nicht nur ich dringend nach Orientierung gesucht: Wer kann einem die Welt erklären? Welche geistige Haltung könnte ein Vorbild sein? Mitte des vorigen Jahrhunderts versprachen aufregende Titel wie »Die Welt in der wir leben« oder »Einstein und das Universum« erste Antworten – und ein Buch namens »Hauptströmungen der Gegenwartsphilosophie«. Der Autor Wolfgang Stegmüller stellte zeitgenössische Denker so dar, dass ich ihre Gedankengänge nachvollziehen konnte, aber auch die fair anmutende Kritik, die Stegmüller an unklaren Ideen vorbrachte. Aus seiner Darstellung sprach ein grundlegendes Vertrauen in Verstand und Verständlichkeit.

Bernulf Kanitscheider, Jahrgang 1939, erlebte diesen Autor unmittelbarer: Er studierte Philosophie an der Universität Innsbruck, als Wolfgang Stegmüller dort gerade seine Karriere begann. Zwar wechselte Stegmüller bald nach München, aber seine rationale, auf formaler Logik basierende Methodik sei für ihn richtungweisend gewesen, erzählt Kanitscheider im Gespräch.

Das schuf damals Konflikte. Wie sich Kanitscheider erinnert, »hatte sich zu meiner Zeit eine skurrile Mischung aus deutschem Idealismus und christlicher Existenzphilosophie breitgemacht, die keinen Raum für nüchterne begriffliche Untersuchungen ließ«. Das galt übrigens nicht nur für Innsbruck. Auch in Wien dominierten, als ich im Rahmen des Physikstudiums ein Philosophikum zu absolvieren hatte, der Hegelianer Erich Heintel und der Existenzphilosoph Leo Gabriel, während Wissenschaftstheorie und mathematische Logik ein Schattendasein fristeten.

Gegen Ende des Philosophiestudiums suchte Kanitscheider ein Forschungsthema, aber am »damaligen Lehrstuhl für Philosophie in Innsbruck wusste man um die Gefahr des logischen Positivismus und kritischen Rationalismus für die traditionelle Seinsmetaphysik. An ein Dissertationsthema aus dem Bereich der analytischen Philosophie war nicht zu denken«. Zwar interessierte Kanitscheider auch die Mathematik wegen ihrer Nähe zur theoretischen Physik, aber selbst da gab es Streit. Als der Mathematik-Ordinarius Wolfgang Gröbner ein Seminar über metaphysisch-theologische Grenzprobleme veranstaltete, drohten ihm die Innsbrucker Theologen mit juristischen Konsequenzen wegen »Religionsstörung« und erreichten, dass Gröbner mit dem Seminar aufhörte.

Erst Ende der 1960er Jahre entspannte sich das Klima; 1968 kam Gerhard Frey auf den neu errichteten Lehrstuhl für Wissenschaftstheorie und Naturphilosophie in Innsbruck, und bei ihm habilitierte sich Kanitscheider über die Anwendung der Geometrie auf empirische Systeme. Später hat ihn der Philosoph Mario Bunge aus den USA besonders beeinflusst, mit dem er bis heute befreundet ist: »Seine realistisch orientierte Erkenntnistheorie und Ontologie waren für mich wie Gleise, auf denen ich zu einer naturalistischen Position gelangte.«



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / OLIVER SCHEPP

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Kanitscheider, woher kommt Ihr für einen Philosophen ungewöhnlich starkes Interesse an den Naturwissenschaften?

Bernulf Kanitscheider: Ich habe als Philosophiestudent wie üblich mit dem Studium der Klassiker angefangen, empfand aber bald ein gewisses Ungenügen an metaphysischen Systemen. Ich merkte, dass vor allem die Vertreter der analytischen Philosophie und der modernen Logik einen ganz anderen Denkstil bevorzugen. Über die Nähe der Logik zur Mathematik entstand schließlich meine Liebe zur Physik.

Spektrum: An diesem Bildungsweg fällt auf, dass Sie für sich anscheinend das Problem der »zwei Kulturen« gelöst haben. Wie stehen Sie zu der oft konstatierten Kluft zwischen Geistes- und Naturwissenschaften?

Kanitscheider: Ich möchte zwei Varianten des Problems unterscheiden. Zum einen gibt es ein psychologisches Bildungsproblem. C. P. Snow hat das in seinem berühmten Essay von 1959 beschrieben: Wenn sich Akademiker abends zu einer gehobenen Unterhaltung treffen, dann wird im Wesentlichen über Themen aus dem klassischen Bildungsbereich gesprochen, und jeder Naturwissenschaftler bemüht sich zu demonstrieren, dass er kein Banause ist, sondern sich in Geschichte und Literatur gut auskennt – von Shakespeare bis zurück zu Homer. Hingegen habe ich noch keinen Geisteswissenschaftler getroffen, der versucht, den Naturwissenschaftlern zu zeigen, dass er etwas mit dem Begriff des Elektrons oder der Entropie anfangen kann – kurz, dass er naturwissenschaftliche Bildung besitzt. Hier herrscht eine offensichtliche Asymmetrie, die bis zum heutigen Tage andauert.

Doch tiefer liegt ein systematisches Problem. Dabei geht es um den Schlüsselbegriff des Geistes. Deutsche Geisteswissenschaftler haben seit Ende des 19. Jahrhunderts immer wieder die Position vertreten, es gebe einen Hiatus – einen unüberbrückbaren Graben, der den Begriff des Geistes von allen biologischen, neurologischen, physiologischen Analysen trennt. Doch wie ich meine, vermag die moderne analytische Philosophie des Geistes diesen Graben zu überbrücken. Das hängt mit meiner realistisch-naturalistischen Weltauffassung zusammen: Die Natur des Geistes fällt nicht aus der rationalen, wissenschaftlichen Analyse heraus, sondern der menschliche Geist ist ein hochinteressantes Phänomen, das von beiden Seiten, von Natur- und

ZUR PERSON

Bernulf Kanitscheider ist Philosoph und Wissenschaftstheoretiker. Er promovierte 1964 über »Das Problem des Bewusstseins« an der Universität Innsbruck, wo er sich 1970 auch mit dem Thema »Geometrie und Wirklichkeit« habilitierte. 1974 wurde er auf den Lehrstuhl für Philosophie der Naturwissenschaft an der Universität Gießen berufen. Seine Arbeitsgebiete sind Kosmologie, philosophische Probleme von Relativitätstheorie und Quantenmechanik, Philosophie der Mathematik und Lebensphilosophie. Seit Oktober 2007 ist Kanitscheider emeritiert.

LEXIKON

- **Metaphysik:** Derjenige Teil der Philosophie – wörtlich »nach der Physik« –, der nach »letzten« Hintergründen des Daseins fragt, etwa: Warum existieren wir, gibt es einen Gott, ist die Wirklichkeit geistig oder materiell oder beides?
- **Ontologie:** Lehre vom Seienden und vom Sein. Sie fragt zum Beispiel: Sind mathematische Gegenstände nur nach Übereinkunft konstruierte Gebilde oder existieren sie unabhängig vom Bewusstsein der Mathematiker als ideelle Objekte?
- **Naturalismus:** eine Philosophie, die auf naturwissenschaftliche Erklärungen vertraut – auch für vermeintlich »übernatürliche« Phänomene
- **Theodizee:** das Problem, wieso ein allmächtiger und allgütiger Gott zulässt, dass es das Böse in der Welt gibt
- **Sozialdarwinismus:** die platte Übertragung missverständlicher biologischer Begriffe wie »Kampf ums Dasein« oder »Rasse« ›››

Geisteswissenschaften symmetrisch anzugehen ist – wobei der Informationsfluss in beiden Richtungen hoch sein muss.

Spektrum: Sie beschreiben sich als Anhänger einer realistisch-naturalistischen Auffassung – eine Position, die von vielen Geisteswissenschaftlern als Provokation empfunden wird. Können Sie das näher erläutern?

Kanitscheider: Naturalismus ist die philosophische Fassung einer Haltung, die im Alltag besagt: Letztlich geht alles mit rechten Dingen zu. Wenn jemand einen Gegenstand verloren hat, sein Auto oder sein Fahrrad nicht mehr findet, dann sagt er zunächst erstaunt: Das geht nicht mit rechten Dingen zu. Doch sobald er sich auf die Suche macht, legt er ein altes philosophisches Prinzip zu Grunde, das der altrömische Philosoph Lukrez mit wunderbarer Klarheit in »De rerum natura« formuliert hat: Dinge, die im Universum vorhanden sind, eine bestimmte Masse besitzen und einen bestimmten Raum einnehmen, verschwinden nicht einfach ins Nichts, und aus dem Nichts entstehen auch nicht einfach irgendwelche Gegenstände. Das ist bereits das Grundprinzip des Naturalismus. Die Welt ist kausal geschlossen, die Dinge darin können sich transformieren, strukturell umbauen, andere Formen annehmen, Strukturen können sich auflösen – aber Materie, Masse und Energie verlieren sich nicht einfach im Universum. Das Universum ist ein kausal geschlossenes System, in dem es mit rechten Dingen zugeht – in dem Sinn, dass es nur Umwandlungen der Materie gibt, aber nicht rätselhafte irrationale Vorgänge, in denen auf einmal mancherorts wunderbare Dinge passieren, die sonst nirgendwo vorkommen.

Spektrum: Nun gibt es aber sogar unter Physikern die Meinung, die Quantenphysik, die einen Bruch mit dem klassischen Determinismus darstellt, eröffne eine Art geistige Freiheit. Insbesondere könne das Problem der Willensfreiheit über die Quantenphysik angegangen werden.

Kanitscheider: Ich bin überzeugt, dass die Quantenphysik zur Lösung des Problems der Freiheit nichts beitragen kann. Handelnde Menschen sind makroskopische Systeme, Willensentscheidungen werden im limbischen System gefällt. Das besteht zwar auf der Mikroebene aus Quarks und Gluonen, aber die Quanteneffekte mitteln sich schon auf der molekularen Ebene durch thermisches Rauschen völlig weg. Das Gehirn ist ein klassisches System, das dem klassischen Determinismus unterworfen ist.

Das Problem der Willensfreiheit halte ich übrigens für ein Scheinproblem. Das Einzige, was wir für die Ethik brauchen, um das freundliche Umgehen der Menschen miteinander zu regeln, ist ein Reglement der Handlungsfreiheit. Die akausale – ursachenlose – Willensfreiheit ist allein im theologischen Kontext notwendig. Sie wurde vom Kirchenlehrer Augustinus im 5. Jahrhundert eingeführt, um das Theodizee-Problem zu lösen, und zwar folgendermaßen: Dass es das Böse in der Welt gibt, ist nicht Gott anzulasten; das muss allein auf die Menschen zurückgeführt werden.

»DAS PROBLEM DER WILLENSFREIHEIT HALTE ICH ÜBRIGENS FÜR EIN SCHEINPROBLEM«

Wenn nun ein globaler Determinismus gilt, der alle makroskopischen Systeme einschließlich der handelnden Menschen umfasst, und wenn die Kausalkette beliebig in die Vergangenheit zurückverfolgt wird, ist die Letztursache für das Böse Gott. Und das darf natürlich nicht sein. Wie löst Augustinus dieses Problem? Indem er die Kausalkette abschneidet und sagt: Die Willensentscheidung zu einer bösen Handlung, die der Mensch fällt, fußt nicht in seinen früheren Zuständen, kann also auch nicht auf Gott zurückgeführt werden.

Das heißt, Theologen brauchen die akausale Willensfreiheit. Hingegen ist Handlungsfreiheit der zentrale Begriff für die politische, soziale, ökonomische …

Spektrum: … kriminologische …

Kanitscheider: … Diskussion. Wenn wir von Unfreiheit in totalitären Staaten sprechen, dann ist es die Einschränkung der Hand-

lungsfreiheit, unter der die Menschen leiden. Die Willensfreiheit wird für keine soziale Frage gebraucht.

Spektrum: Wie stehen Sie überhaupt zum Verhältnis zwischen Religion und Naturwissenschaft? Favorisieren Sie ein friedliches Nebeneinander?

Kanitscheider: Hans Küng propagiert in seinem Buch »Der Anfang aller Dinge« eine Art Komplementarität von Religion und Naturforschung, und Jürgen Habermas hat ihm in »Zwischen Naturalismus und Religion« sekundiert, indem er eine Kompetenzabgrenzung vorschlug: Die Kompetenz für die Interpretation von religiösen Sätzen soll man den Theologen überlassen.

Hans Küng hat als Theologe natürlich ein Interesse daran, sich die Kritik der Wissenschaft vom Leib zu halten. Ich meine, das ist eine unhaltbare Position, weil jede Religion – ob Buddhismus, Islam oder Christentum – bereits eine Metaphysik und eine Kosmologie voraussetzt. Das Alte Testament beginnt mit einer Schöpfungsgeschichte: Die Vielfalt der Strukturen, die wir beobachten, kam in die Welt durch göttlichen Entschluss, durch kreatives Handeln. Damit ist automatisch der Konflikt vorgegeben. Es gibt kosmologische Modelle, die einen Anfang in der Zeit haben, und andere mit unendlichem Alter, und nicht alle Modelle können zugleich wahr sein. Wenn Widersprüche vorhanden sind, soll man sie austragen. Darüber können Geistes- und Naturwissenschaftler offen miteinander sprechen.

Spektrum: Von religiösen Menschen wird oft der Satz von Dostojewski zitiert: Wenn es keinen Gott gibt, ist alles erlaubt. Brauchen wir Religion, weil es sonst keine richtungweisenden Werte gibt? Kann es so etwas geben wie eine naturalistische Ethik?

Kanitscheider: Die Antwort, die Naturalisten wie der amerikanische Philosoph Daniel Dennett heute darauf geben, beginnt mit einem Hinweis auf Darwins Theorie, die Evolutionsbiologie. Im Tierreich gilt keinesfalls nur das Gesetz des Dschungels, sondern wir stellen dort ein moralanaloges Verhalten fest. Selbst niedere Tiere wie Insekten haben eine ausgefeilte Sozialstruktur entwickelt. Tierisches Verhalten ist freilich nicht bewusst gesteuert, sondern instinkthaft beziehungsweise neurologisch fest verdrahtet. Doch da die Abstammungslehre einen stetigen Übergang der Tierpopulationen zu den Primaten bis zum *Homo sapiens* belegt, ist es ganz unwahrscheinlich, dass Moral keine Verankerung in der Stammesgeschichte hat.

Spektrum: Unter Geisteswissenschaftlern weckt aber eine Herleitung der menschlichen Moral aus der Evolutionslehre sofort den Verdacht auf Sozialdarwinismus.

Kanitscheider: Wie die Evolutionsgeschichte uns lehrt, ist ein Regelsystem für das Zusammenleben in jedem Fall notwendig. Diese Regeln können aber unter Menschen, anders als im Tierreich, der bewussten Reflexion ausgesetzt werden. Anders als etwa Termiten können Menschen die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Regeln rational verhandeln. Sie können die einzelnen Axiome ethischen Handelns einer kritischen Diskussion aussetzen und überlegen: Sollen wir die eine Maxime durch eine andere ersetzen? Sie können überzogene Forderungen der Normensysteme zurückweisen. Schon im römischen Recht galt der Grundsatz *Ultra posse nemo obligatur*. Das heißt, eine normative Forderung an einen Menschen setzt das Können voraus. Es ist nicht sinnvoll, den Menschen einen Forde-

»SELBST NIEDERE TIERE HABEN AUSGEFEILTE SOZIALSTRUKTUREN«

›› auf vermeintliche Normen menschlichen Zusammenlebens

■ **Utilitarismus:** Nützlichkeitsethik nach dem Prinzip: Handle so, dass das größtmögliche Maß an Glück entsteht.

rungskatalog vorzulegen, der so rigide ist, dass der Mensch ihn auf Grund seiner evolutionären Ausstattung gar nicht erfüllen kann.

Spektrum: Können Sie uns dafür ein Beispiel geben?

Kanitscheider: Die christliche Sexualmoral ist ein typischer Fall, in dem der Forderungskatalog viel zu hoch angesetzt worden ist gegenüber dem menschlichen Triebpotenzial. Auf Grund rationaler Reflexion kann man durchaus Korrekturen anbringen und sagen: Dieser Katalog muss gar nicht erfüllt werden; für ein gedeihliches Zusammenleben kann man durchaus etwas von dieser rigiden Sexualmoral herunterfahren. Das sind typische Argumentationen im Überlagerungsfeld von Natur und Kultur, wo eine Wechselwirkung nicht nur möglich, sondern sogar notwendig ist.

Spektrum: Das heißt, aus der Betrachtung der Natur lassen sich Regeln für soziales Verhalten herleiten.

Kanitscheider: Genau das machen wir, wenn wir an einer evolutionären Ethik arbeiten. Diese Naturalisierung der Ethik bedeutet nicht einfach: Wir finden etwas in der Natur und heißen es dann gut. Wenn wir in der Natur Kampf und Grausamkeit vorfinden, ist das nicht schon das Gute. Vielmehr setzen wir die empirisch gefundene Vorstrukturierung der menschlichen Natur einer rationalen Diskussion aus und fragen: Was lässt sich davon sinnvoll in den Normenbereich übernehmen, wo müssen wir korrigieren und ausbremsen? Naturalisierung der Ethik bedeutet, dass man durch reflektierende Vernunft auf die Vorstrukturierung des Menschen, auf die im limbischen System und letzten Ende in der DNA vorprogrammierte Verhaltensgenetik Rücksicht nimmt.

»DIE CHRISTLICHE SEXUALMORAL FORDERT ANGESICHTS DES MENSCHLICHEN TRIEBPOTENZIALS VIEL ZU VIEL«

Spektrum: Wird durch die naturalistische Betrachtungsweise nicht der Begriff des Geistes entwertet, quasi wegnaturalisiert?

Kanitscheider: Ganz im Gegenteil. Der Begriff des Geistes ist zu wichtig, als dass man ihn einfach der Narration, der historischen Nacherzählung, überlassen darf, als wäre er eine Art Unterhaltungssendung nach getaner Arbeit. Naturwissenschaftler gehen tagsüber in ihre Labors, untersuchen dort Elementarteilchen, lösen schwierige Differenzialgleichungen, und wenn sie abends nach Hause kommen, hören sie Verzauberungsgeschichten aus ihrer historischen Vergangenheit – diese Vorstellung von Geist halte ich für zu schwach. Sie wird der Bedeutung des Begriffs nicht gerecht. Geist produziert nicht nur Geschichten, sondern analysiert auch die Natur. Mit Hilfe des Geistes versuchen wir den Fundamenten der Natur auf die Spur zu kommen, und dieses Instrument zu verstehen ist eine wichtige Aufgabe der Wissenschaft.

Spektrum: Ich bin überrascht, wie Sie als Anwalt des Geistes auftreten und ihn förmlich gegen die Geisteswissenschaftler in Schutz nehmen! Was ist für Sie nun »das Geistige«?

Kanitscheider: Der Begriff des Geistes muss aus evolutionärer Perspektive verstanden werden. Die Natur hat unterschiedlichste Strukturen entwickelt – von Galaxien und Sternen zu Planeten mit Gesteinsoberflächen, auf denen Leben entstehen konnte. In Einklang mit den Erkenntnissen der Hirnforschung muss ein Begriff des Geistes gefunden werden, der auf naturwissenschaftlicher Basis ruht, dann aber kombiniert wird mit dem geisteswissenschaftlichen Selbstverständnis, wie es aus der Historie tradiert ist. Der Neurologe beschreibt, wie der Geist funktioniert, versucht mit bildgebenden Verfahren die Aktivitäten

des Gehirns zu rekonstruieren – und der Philosoph kommt ihm entgegen und liefert die Begriffe, die dann der Neurobiologe in dem von ihm untersuchten Substrat wiederfindet. Das ist nicht utopisch: Wir haben eine analytische Philosophie des Geistes, eine Disziplin, in der neurobiologisch ausgebildete Philosophen arbeiten, wobei die phänomenologischen Analysen der Geisteswissenschaftler den Naturwissenschaftlern bei ihren neurobiologischen Analysen helfen. Das gleicht ein wenig dem Verhältnis von phänomenologischer Wärmelehre und statistischer Mechanik: Erstere kam historisch zuerst und formulierte Begriffe wie Wärme, Druck und Entropie – und dann explizierte Letztere diese Begriffe, etwa die Entropie durch die H-Funktion der statistischen Thermodynamik. So müssen auch Natur- und Geisteswissenschaften aufeinander zugehen, um den Begriff des Geistes zu klären.

Spektrum: Also kein Kampf der Disziplinen, aus dem die Naturwissenschaft mit einer restlosen Naturalisierung des Geistes als Sieger hervorgeht? Keine Geringschätzung der Geisteswissenschaften, als wäre sie bloß die Begleitmusik des naturwissenschaftlich-technischen Fortschritts?

Kanitscheider: Das wäre eine Blockade, eine Zurücknahme des systematischen Denkens. Nur gemeinsam lässt sich das große Rätsel lösen, wie der Geist ins Universum gekommen ist.

Spektrum: Gegen den Naturalismus der Hirnforscher wird oft eingewandt, damit werde die Zurechenbarkeit von Handlungen geleugnet. Könnte man da nicht gleich die Gerichte abschaffen und nur noch Sozialtherapie für Leute mit asozialem Verhalten betreiben?

Kanitscheider: An der rechtlichen Praxis muss sich gar nichts ändern, nur an der moralischen Verurteilung. Wer in einer ungünstigen sozialen Umgebung aufgewachsen ist und vielleicht auch noch ungünstige Verhaltensgene mitbekommen hat, wurde von der Natur und von seinem Umfeld benachteiligt. Wenn er sehr schädliche Handlungen setzt, müssen die Mitmenschen natürlich vor ihm geschützt werden; er kann nicht frei herumlaufen. Aber die moralischen und theologischen Vorwürfe kann man sich sparen. Begriffe wie Sünde, Sühne, Vergehen gegen die göttliche Ordnung und dergleichen sind überflüssig.

Spektrum: Lässt sich aus dem Naturalismus eine Moral ableiten, eine Anleitung zu richtigem Handeln?

Kanitscheider: Ich habe mich gefragt: Welche Ethik liegt dem Naturalismus am nächsten? Da bin ich auf antike Vorbilder gestoßen, die wie Aristippos von Kyrene und Epikur einfach feststellen, dass Tiere und Menschen – Kinder wie Erwachsene – eines gemeinsam haben: Sie streben von Natur aus nach Lust. Sie sind bestrebt, ihr Glück, ihr Wohlbefinden, ihre inneren Zustände zu optimieren. Die Frage ist: Kann man dieses Glücksaxiom als Basis einer Ethik auffassen? Epikur, Lukrez und andere, die in der materialistischen Denktradition stehen, sagen: Das geht ohne Weiteres.

Später haben Utilitaristen wie Jeremy Bentham in dieser Richtung weitergedacht und ebenfalls gefunden, dass wir Glücksoptimierer sind. Sie fragten: Können wir aus dieser Tatsache einen Begriff des gelungenen Lebens entwickeln? Die Antwort ergibt grob gesagt das Prinzip einer hedonistischen Ethik: Das gelungene, vollendete, erfüllte Leben ist eines, in dem wir in Einklang mit unserer Natur das Beste aus unseren Möglichkeiten gemacht haben – selbstverständlich ohne den Mitmenschen zu schaden, ohne andere unglücklich zu machen. ◁

»WELCHE ETHIK LIEGT DEM NATURALISMUS AM NÄCHSTEN?«

Michael Springer, der die Fragen stellte, ist Wissenschaftsredakteur und freier Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Bunge, M., Mahner, M.: Über die Natur der Dinge. Materialismus und Wissenschaft. Hirzel, Stuttgart 2004.

Dennett, D. C.: Darwins gefährliches Erbe. Die Evolution und der Sinn des Lebens. Hoffmann und Campe, Hamburg 2002.

Dessau, B., Kanitscheider, B.: Von Lust und Freude. Gedanken zu einer hedonistischen Lebensorientierung. Insel, Frankfurt 2000.

Habermas, J.: Zwischen Naturalismus und Religion. Philosophische Aufsätze. Suhrkamp, Frankfurt 2005.

Kanitscheider, B.: Die Materie und ihre Schatten. Naturalistische Wissenschaftsphilosophie. Alibri, Aschaffenburg 2007.

Kanitscheider, B.: Kosmologie. Geschichte und Systematik in philosophischer Perspektive. Reclam, Stuttgart 2002.

Küng, H.: Der Anfang aller Dinge. Naturwissenschaft und Religion. Piper, München 2005.

Snow, C. P. et al.: Die zwei Kulturen. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1987.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957497.

Von der Grafikkarte bis zum Lackierroboter

Aus dem Bundeswettbewerb »Jugend forscht«, der in diesem Jahr in der Stadthalle Bremerhaven ausgetragen wurde, bringen wir in diesem und dem folgenden Heft eine Auswahl von Arbeiten.

Von Christoph Pöppe

FORD-KREISE

Das Spiel fängt ganz harmlos an: Man setze zwei Kreise vom Radius 1/2 auf die Punkte 0 und 1 der reellen Geraden, so dass sie sich berühren, und fülle den dreieckigen Zwickel zwischen ihnen mit dem größtmöglichen Kreis. Zwischen der Geraden, dem neuen Kreis und jeweils einem alten bleiben wieder krummlinige Dreiecke übrig, die man abermals mit dem größtmöglichen Kreis füllt, und so weiter: ein Spezialfall einer apollonischen Kreispackung (Spektrum der Wissenschaft 11/2002, S. 116).

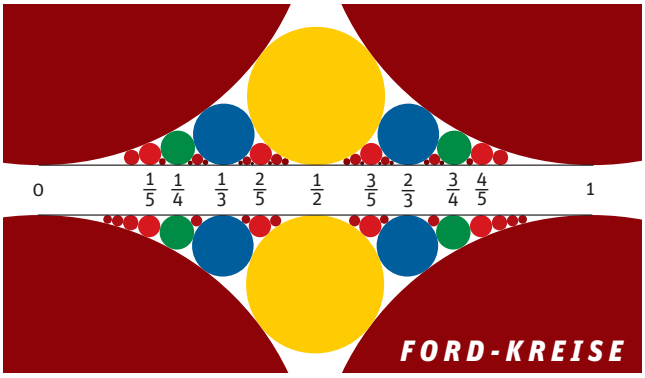
Der Punkt, an dem ein Kreis dieser unendlichen Folge die reelle Gerade berührt, entspricht stets einer rationalen Zahl. Mehr noch: Auf jeder rationalen Zahl p/q sitzt ein Kreis dieser Packung, und zwar mit dem Radius $1/(2q^2)$. Die Folge dieser so genannten Ford-Kreise, benannt nach dem amerikanischen Mathematiker Lester R. Ford (1886–1967), der sie 1938 entdeckte, ist also eine Abzählung der rationalen Zahlen, die im Gegensatz zur üblichen cantorschen Diagonalabzählung über etliche interessante Eigenschaften verfügt.

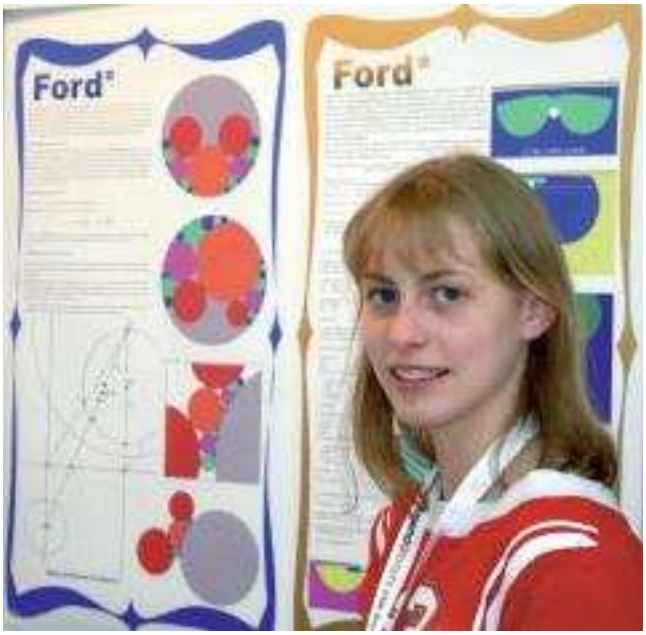
Da die Koordinaten der Ford-Kreise nach einer einfachen Regel errechenbar sind, lassen sich jede Menge Fragen dazu mit hinreichend Scharfsinn explizit beantworten: Die Folge der Zähler und die der Nenner bestehen wie ein Rondo in der Musik aus immer wiederkehrenden Motiven. Man kann angeben, bei welchem Schritt der Konstruktion eine bestimmte rationale Zahl erstmals auftaucht. Im Lauf der Untersuchung treten sämtliche üblichen Verdächtigen aus der Zahlentheorie auf: Euklids Algorithmus zur Bestimmung des größten gemeinsamen Teilers, Kettenbrüche, Fibonacci-Zahlen, die Funktion, welche die Anzahl der Teiler einer Zahl angibt, bis hin zur berüchtigten riemannschen Zetafunktion, von der die immer noch ungelöste riemannsche Vermutung handelt.

Jessica Fintzen (19) aus Quickborn, Malte Lackmann (17) aus Bordesholm und Andreas Decker (19) aus Vechta kennen sich nicht, wie üblich, von einer gemeinsamen Schule, sondern vom internationalen Mathematikwettbewerb »Baltic Way« 2006. Gemeinsam haben sie nicht nur die – bisher nur spärlich dokumentierte – Theorie der Ford-Kreise erarbeitet, sondern sie auch in die verschiedensten Richtungen verallgemeinert. So betrachteten sie den Fall, dass die beiden Urkreise die reelle Gerade nicht berühren oder die Gerade durch einen Kreis ersetzt wird. Es war vor allem die Fülle der Ergebnisse und die geradezu professionelle Darstellung, die dem Dreierteam den 1. Preis im Fach Mathematik/Informatik eingebracht hat.

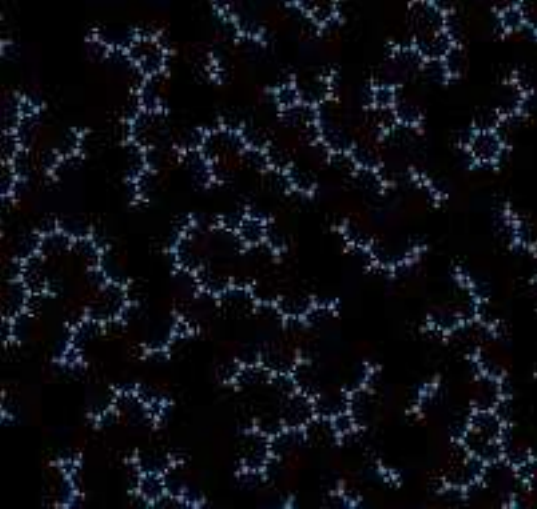
Auch sonst sind die Preisträger wissenschaftlich nicht unterbeschäftigt: Jessica Fintzen und Malte Lackmann haben

Man setze auf die rationalen Zahlen p/q zwischen 0 und 1 Kreise mit dem Radius $1/(2q^2)$. Einerlei ob man nach der Konstruktion von Ford stets zwischen zwei bestehende Kreise den größtmöglichen dritten einfügt (unten, obere Bildhälfte) oder schlicht alle rationalen Zahlen mit Nenner unterhalb einer gewissen Schranke, hier 8, mit Kreisen versieht (unten) – im Grenzwert erreicht man stets alle rationalen Zahlen. Jessica Fintzen (rechts) und ihre Mitstreiter haben dieses Verfahren in viele Richtungen verallgemeinert.





BEIDE ABBILDUNGEN: CHRISTOPH PÖPPE



BEIDE ABBILDUNGEN: HEIKO BURAU

RECHNEN MIT DER GRAFIKKARTE

Auf der Grafikkarte von Heiko Buraus PC laufen mit hoher Geschwindigkeit Simulationen von zu Eis gefrierenden Wassermolekülen (links) und von strömendem Gas samt Wirbelbildung.

sich für die Teilnahme an der Internationalen Mathematik-Olympiade dieses Jahres in Madrid qualifiziert, Jessica Fintzen darüber hinaus für die Internationale Physik-Olympiade in Hanoi.

RECHNEN MIT DER GRAFIKKARTE

In einem Computerspiel sind die Oberflächen aller Figuren und Requisiten aus lauter kleinen Dreiecken zusammengesetzt. Hat der Computer zu einem gewissen Zeitpunkt deren Positionen bis aufs letzte Dreieck genau berechnet, dann ist das aktuelle Bild im Wesentlichen fertig – sollte man meinen. Aber der aufwändigste Teil der Bildberechnung kommt erst noch. Für jeden der etwa eine Million Bildpunkte (»Pixel«) muss bestimmt werden, welches Dreieck an dieser Stelle vom Betrachter aus gesehen zuvorderst liegt und daher sichtbar ist, und dieses Dreieck muss mit der Musterung (»Textur«) überzogen werden, die zu seiner Oberfläche gehört. Diese Arbeit erledigt in modernen PCs die Grafikkarte, früher ein relativ langweiliger Zwischenspeicher für Bilddaten, heute ein Computer im Computer, der über mehr Rechenkapazität verfügt als der zentrale Prozessor, diese aber nur für sehr spezielle Zwecke einsetzt.

Heiko Burau (19) aus Münstereifel kam – nicht als Erster, wie er später enttäuscht feststellen musste – auf die Idee, die Grafikkarte für ebenso spezielle Zwecke zweckzuentfremden: für Simulationen physikalischer Vorgänge, insbesondere Strömungsphänomene. Dafür pflegen die professionellen Rechner schweres Geschütz aufzufahren: eine nichtlineare partielle Differenzialgleichung namens Navier-Stokes-Gleichung und zahllose raffinierte Verfahren zu deren näherungsweiser Lösung (Spektrum der Wissenschaft 7/1996, S. 72).

Eine sehr spezielle Näherung – ungeeignet für eine naturgetreue Simulation, aber ausreichend für eine qualitative Wiedergabe – reduziert die Rechenarbeit im Wesentlichen auf zwei Operationen: Bilde einen Mittelwert über alle unmittelbaren Nachbarn eines Bildpunkts, um die ausgleichende Wirkung der inneren Reibung zu berücksichtigen (den »Diffusionsterm«); und interpoliere zwischen den Werten zweier Punkte zur Wiedergabe von Transportvorgängen. Genau das kann eine Grafikkarte sehr elegant. Eigentlich mittelt und interpoliert sie Farbwerte zur Texturberechnung; aber durch raffinierte Programmierung lässt sie sich diesem Zweck willig entfremden. So gelingen Heiko Burau Simulationen mit einer Geschwindigkeit, die mit dem zentralen Prozessor nicht zu erreichen wäre.

Neuere Grafikkarten lassen sich noch erheblich freier programmieren. Mit ihnen konnte der Jungforscher seine Ideen auf weitere physikalische Phänomene erweitern. Auf seinem Bildschirm pflanzen sich Wellen fort, brechen sich an Hindernissen und interferieren miteinander; zahlreiche Wassermoleküle flitzen umher, lagern sich aneinander und kommen bis auf ein bisschen Gezappel zur Ruhe, wenn die fiktive Temperatur im System unter den Gefrierpunkt fällt (Bild oben).

GRAPHENE

Heikos Schule, das St.-Michael-Gymnasium in Münstereifel, hat noch ein weiteres Team bis in den Bundeswettbewerb gebracht: Tobias Kaufmann (15), Luca Banszerus (16) und Michael Schmitz (16) gelang es, Kohlenstoffschichten herzustellen, die genau eine Atomlage dick sind: »Graphen«, mit Betonung auf dem e. Die technischen Mittel sind eines Schülerwettbewerbs wahrhaft würdig: Die Knaben drücken Tesafilm auf ein Stück Grafit, ziehen ihn wieder ab und kleben ihn samt anhaftenden Partikeln auf ein Siliziumscheibchen. Der weniger triviale Teil der Aktion bestand darin, unterm Mikroskop diejenigen Kohlenstoffflöckchen ausfindig zu machen, die tatsächlich nur eine Atomlage dick waren. Dafür gab es den Preis der Bundeskanzlerin »für die originellste Arbeit«.

CHRISTOPH PÖPPE

LEVITRON

Felix Risch (19; abgebildet) aus Landau und Maximilian Klein (19) aus Edenkoben erreichen mittels Helmholtz-Spulen und sorgfältig austariertem Permanentmagneten Rekordlaufzeiten für den kleinen Magnetkreisel (das »Levitron«).

NILS BECKER

Die Mandelbrot-Menge für die Iteration $z \to z^{-2}+c$ erstreckt sich bis ins Unendliche; das chaotische Verhalten ist auf das Innere des krummlinig begrenzten Dreiecks beschränkt.

VERALLGEMEINERTE APFELMÄNNCHEN

Ein Floh springt nach einer festgelegten Vorschrift über die Ebene. In dem Punkt, an dem er sich gerade befindet, findet er durch Anwendung einer einfachen Formel den Zielpunkt seines nächsten Sprungs. Und doch ist sein Verhalten möglicherweise völlig chaotisch. Die Aufzeichnung seiner Bewegungen liefert ein Fraktal, und aus einem Katalog aller Flöhe entsteht die berühmte Mandelbrot-Menge. Seit fast dreißig Jahren wird sie nun von Mathematikern und vor allem von Computerkünstlern studiert – und siehe da, es gibt immer noch Neues zu entdecken.

Nils Becker (17) aus Königstein (Taunus) hat zunächst nichts weiter getan als ein Vorzeichen umgedreht. Die klassische Iterations-(Flohsprung-)Formel für die Mandelbrot-Menge lautet $z \to z^2+c$, wobei z und c als komplexe Zahlen aufzufassen sind. Setzt man z^3, z^4, …, z^k an die Stelle von z^2, so wird aus dem vertrauten Apfelmännchen eine zwei-, drei-, … $(k-1)$-zählig symmetrische, ebenso stachlige Figur. Aber wenn der Exponent negativ wird? Dann bricht an der Theorie einiges zusammen und muss durch Neues ersetzt werden.

Beim klassischen Apfelmännchen weiß man: Wenn der Floh über eine gewisse Entfernung vom Nullpunkt hinausspringt, kommt er nie wieder zurück. Aber für große z ist zum Beispiel z^{-4} sehr klein; ein Floh, der weit nach draußen gerät, wird von der Iterationsfunktion immer wieder in die Nähe des Punktes c zurückgeholt. Deswegen ist die übliche Definition der Mandelbrot-Menge als »alle Flöhe, die nicht irgendwann ins Unendliche verschwinden«, was mit einer schlichten Ungleichung nachprüfbar ist, nicht mehr brauchbar. An ihre Stelle tritt die Formulierung »alle Flöhe, die sich auf die Dauer zu einem regelmäßigen (periodischen) Verhalten bequemen«. Diese Bedingung mit dem Computer nachzuprüfen ist schwieriger.

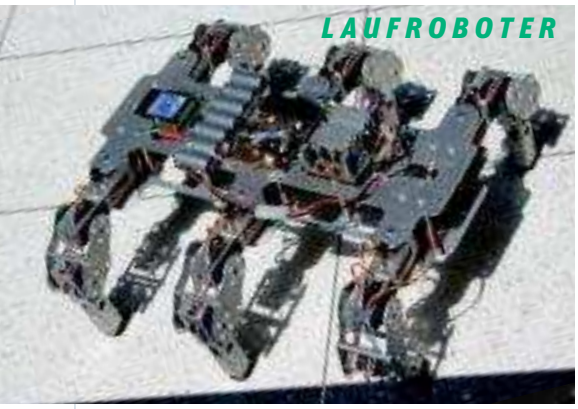
Theoretisch liefert der so genannte Ljapunow-Exponent (Spektrum der Wissenschaft 4/1995, S. 66) das gesuchte Kriterium. Aber das ist so etwas wie ein Mittelwert über unendlich viele Zahlen – eine pro Flohsprung. Nils Becker hat eine numerisch effiziente Näherung für den Ljapunow-Exponenten gefunden und damit eine neue Methode zur Erzeugung unkonventioneller Fraktalbilder. Diese Leistung und einige Anwendungen seines Programms honorierte die Jury mit einem 4. Preis.

LAUFROBOTER

Man erlebt es zuweilen beim Aufstehen nach einem besonders sportlichen Tag – oder nach durchzechter Nacht: Die Beine sind kürzer und der Kopf dicker als gewohnt, und erst nach ein paar torkeligen Schritten stellt sich das gewohnte Körpergefühl wieder ein. Ein Regelkreis innerhalb unseres Nervensystems hat die Kraft, die aufzuwenden ist, um eine bestimmte Bewegung auszuführen, wieder in Einklang mit der Realität gebracht.

So ähnlich geht es auch dem sechsbeinigen Laufroboter von Matthias Schnaubelt (18) aus Zwingenberg (Hessen). Wie bei Insekten üblich, marschieren das linke Vorder-, das rechte Mittel- und das linke Hinterbein einerseits, die drei restlichen Beine andererseits jeweils im Gleichtakt. Drucksensoren in den Gummifüßen geben ihm ein Gefühl dafür, welcher Anteil seines Gewichts auf welchem Fuß lastet und wie matschig der Untergrund ist. Vor allem aber: Über kleine, transparente, mit einem Streifenmuster versehene Scheibchen, die sich – zum Beispiel – mit den Oberschenkeln mitdrehen und mit Lichtquelle und Fotozelle abgelesen werden (Bilder links unten), erfährt er, welche Wirkung eine Aktion des zugehörigen Stellmotors (der »Beinmuskulatur«) tatsächlich hat, und gewinnt daraus das für einen sicheren Gang unerlässliche Körpergefühl. Dafür gab es den 2. Preis im Fach Technik.

Der 1. Preis ging an Thomas Nesch (19). Der Auszubildende bei Daimler in Stuttgart hat einen Sensor entwickelt, der Lackierroboter vor »inneren Blutungen« warnt. Mehrere Lackkomponenten strömen zur Spritzdüse durch Schläuche im Arm des Roboters, die durch die vielen Handbewegungen stark beansprucht werden. Ein unbemerktes Leck im Schlauch verursacht teure Produktionsausfälle. Ein elektrischer Sensor war wegen der elektrostatischen Aufladung der zu lackierenden Teile nicht einsetzbar. Thomas Nesch gelang es, Flüssigkeiten, auch transparente, in sehr kleinen Mengen mit optischen Mitteln nachzuweisen. ◁



BEIDE FOTOS: CHRISTOPH PÖPPE

Körpergefühl mit Fotozelle: Durch Selbstbeobachtung findet der sechsbeinige Laufroboter von Matthias Schnaubelt den richtigen Kraftaufwand für eine geplante Bewegung.

Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

AUTOR

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/958137.

 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Warum wir sterben

Statistiken belegen die sprunghafte Entwicklung der Lebenserwartung in der Neuzeit, beantworten jedoch nicht die grundlegende Frage, weshalb der Mensch überhaupt sterblich ist.

Von Robert L. Dorit

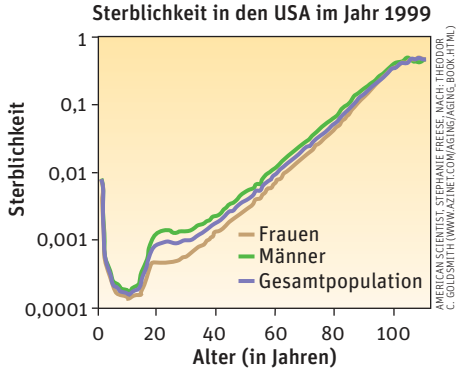
Nur selten stelle ich mir meinen eigenen Tod vor. Wenn ich es tue, dann in sehr verschiedenen Szenarien. Manchmal denke ich mir einen plötzlichen, unerwarteten Tod, einen Schlaganfall, Herzinfarkt, Autounfall – Tribut an die Unvorhersagbarkeit des Lebens. Lieber ist mir allerdings die Vorstellung eines sanfteren Übergangs weit in der Zukunft, wenn mein Körper verbraucht ist und ich bereit bin zu gehen, ohne dass ich meine Lebensspanne schon überzogen hätte. Meine Geschichte wird jedenfalls ein Ende haben – nur weiß ich noch nicht, wie es aussehen wird.

Wahrscheinlich sind wir die einzigen Lebewesen auf der Erde, die sich ihrer eigenen Sterblichkeit bewusst sind. Doch trotz der zentralen Rolle des Todes für das Selbstverständnis des Menschen ist unser Ableben ein biologisches Phänomen, das sich bisher einer Erklärung weit gehend entzieht. Schicksale und Unfälle beenden manches Leben, doch davon einmal abgesehen können wir die einfache Frage bisher nicht beantworten, weshalb wir eigentlich sterben. Die Frage ist nur scheinbar einfach, und darauf gibt es auch sicher mehr als eine Antwort, denn jeder stirbt letztlich auf seine eigene Art. Doch hier geht es nicht um eine Schau vieler individueller Schicksale, sondern um eine allgemeingültigere Antwort, die auf der materiellen Grundlage unserer Existenz basiert und die verschiedenen Muster der menschlichen Sterblichkeit erklären soll. Für diese Betrachtung will ich Todesfälle durch äußere Ursachen wie Unfälle oder Gewaltverbrechen außer Acht lassen, da sie uns nur wenig über die biologischen Grundlagen der Sterblichkeit sagen.

Unsere Arten zu sterben haben sich im Lauf der Menschheitsgeschichte gewandelt. Fossilien des frühen *Homo sapiens* lassen Rückschlüsse auf Zeitpunkt und Ursache des Todes zu. Anhand des Zustands der gefundenen Skelette und der Abnutzung ihrer Zähne schätzt man die damalige mittlere Lebenserwartung auf 25 Jahre. Für jüngere Epochen (Zehntausende von Jahren später), in denen bereits schriftliche Aufzeichnungen und Grabinschriften üblich wurden, können wir die Lebensspanne wesentlich genauer beurteilen. Sie zeigt eine dramatische Entwicklung: Erst in den letzten tausend Jahren haben sich die Lebenserwartung und die Faktoren, die sie beeinflussen, deutlich verändert. In den USA zum Beispiel prognostiziert die Social Security Administration bis zum Jahr 2050 einen Anstieg der mittleren Lebensdauer auf 77 Jahre für Männer und auf 83 Jahre für Frauen.

Dies entspricht einer Verdreifachung der Lebenserwartung zum Geburtszeitpunkt innerhalb von nur 50 Generationen. Wie ist diese enorme Veränderung zu erklären? Es ist ein verbreitetes Missverständnis, dass um das Jahr 1000 n. Chr. nur wenige 30-Jährige lebten, die dazu noch alte Leute waren. Die Angabe einer mittleren Lebenserwartung von 30 Jahren bedeutet etwas anderes. Im Jahr 1000 n. Chr. wandelten auf den Straßen durchaus etliche 50-Jährige. Die Lebenserwartung für den Zeitpunkt der Geburt ist eine artifizielle statistische Größe, die auf dem Durchschnitt der Sterblichkeit beruht, gemittelt über alle Altersgruppen. Sie gibt an, wie lange ein heute geborener Mensch auf der Basis der aktuellen Sterberaten im Mittel voraussichtlich noch leben wird. Diese Definition hat weit reichende Konsequenzen.

Vor tausend Jahren hing die Aussicht eines Menschen, ein reiferes Alter zu erreichen, in erster Linie davon ab, ob er die ersten fünf Jahre überlebte. Wer seinen fünften Geburtstag feiern konnte, hatte relativ gute Chancen, auch 60 Jahre alt zu werden, denn die durchschnittliche Lebenserwartung wurde damals vor



Die Sterblichkeit in den beiden ersten Lebensjahren ist hoch, sinkt jedoch zunächst. Um die 50 erreicht sie dann wieder die der Säuglinge. Frauen haben über die gesamte Lebenszeit ein niedrigeres Sterberisiko, was allerdings erst ab 20 deutlich wird.

BRIDGEMAN BERLIN

Der Stich »El Jarabe de Ultratumba« (Der Tanz jenseits des Grabes) des mexikanischen Malers José Guadelupe Posada (1852 – 1913) spiegelt eine makabre Haltung zum Tod wider.

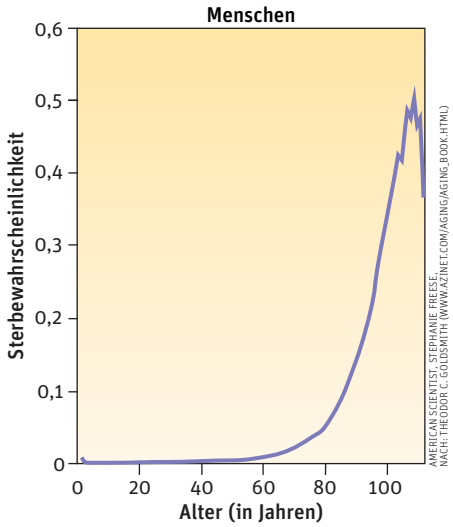
allem von der Säuglingssterblichkeit bestimmt. Die Zunahme der zu erwartenden Lebensspanne im Lauf der darauf folgenden 800 Jahre ist, besonders den letzten hundert Jahren, größtenteils auf die gestiegenen Überlebenschancen von Säuglingen und Kleinkindern zurückzuführen. Diese verdanken sich meist besserer Hygiene und erfolgreicher Behandlung von Infektionskrankheiten. Leider liegt die Lebenserwartung bei Geburt weltweit in 27 von 136 Ländern noch immer unter 50 Jahren. Zum einen konnte die Kindersterblichkeit in diesen Regionen mit ihren 500 Millionen Einwohnern noch nicht ausreichend gesenkt werden. Zum anderen stieg die Sterblichkeit junger Erwachsener durch Kriege und die Aids-Pandemie.

Sinkende Geburtenrate

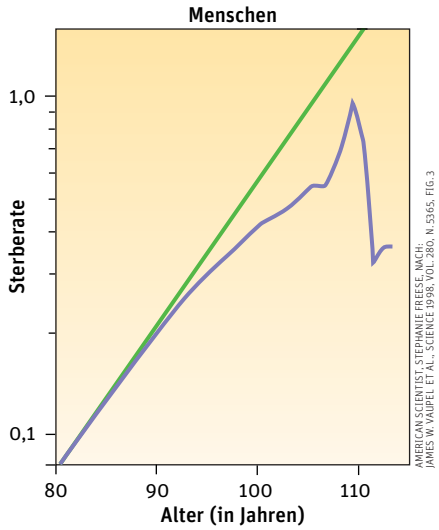
Dass die Lebenserwartung in den Industrieländern in den letzten Jahren rapide zunahm, lässt sich jedoch inzwischen nicht mehr durch bessere Überlebenschancen von Säuglingen und Kleinkindern erklären, sondern vielmehr auf Grund von zwei ganz anderen Faktoren. Erstens ging die Geburtenrate zurück, was den Einfluss der Kindersterblichkeit auf die berechnete Lebenserwartung zum Zeitpunkt der Geburt senkt. Zweitens nahm die Lebensdauer der Erwachsenen zu. Die steigende Lebenserwartung ist heute also nicht darauf zurückzuführen, dass mehr Menschen ihre Kindheit überstehen, sondern dass immer mehr Menschen tatsächlich länger leben und die gestiegenen Überlebenschancen dieser Menschen heute die Statistik stärker beeinflussen.

Angesichts der vielen Faktoren, die in die Berechnung der Lebenserwartung eingehen, ist das nicht der optimale Weg, um die Mechanismen der Sterblichkeit angemessen zu verstehen. Einen besseren Ansatz bietet vermutlich die Betrachtung altersspezifischer Angaben, also etwa die Wahrscheinlichkeit, ein bestimmtes Altersintervall zu überleben. Üblicherweise werden hier Abschnitte von jeweils fünf Jahren betrachtet (zum Beispiel der Zeitraum zwischen der Geburt und dem 5. Lebensjahr oder zwischen dem 40. und 45. Lebensjahr). Bekannt ist seit Längerem, dass die ersten fünf Lebensjahre hohe Risiken bergen, die Zeit zwischen 5 und 30 jedoch weit weniger gefährlich ist. Alternativ lässt sich die altersspezifische Sterberate betrachten, genauer: die so genannte Sterbeintensität *(force of mortality)*, gemessen in Todesfällen einer Bevölkerung des jeweiligen Alters pro Jahr.

Das Konzept der Sterbeintensität beruht wesentlich auf den Arbeiten des brillanten bri-



Für die ersten fünf Lebensjahrzehnte ist das Sterberisiko in den Industrieländern altersspezifisch gesehen relativ gering. Erst danach steigt es rapide an.



Erst für die Altersgruppe ab 80 (violette Linie) wird die Abweichung von Gompertz' Exponentialgesetz deutlich erkennbar (grüne Linie). Der zunehmende Abstand zwischen den Kurven bedeutet, dass die altersspezifische Sterblichkeit im hohen Alter wieder sinkt.

tischen Mathematikers Benjamin Gompertz aus dem 19. Jahrhundert. Als Jude durfte er damals nicht an einer englischen Universität studieren und eignete sich seine mathematischen Kenntnisse autodidaktisch an. Dennoch wurde er 1819 in die Royal Society aufgenommen. Im Jahr 1852 publizierte er in den »Philosophical Transactions« eine Abhandlung mit dem Titel »On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies« (Über die Natur der Funktion, die das Gesetz der menschlichen Sterblichkeit beschreibt, und über eine neue Methode zur Bestimmung des Wertes von Lebenszeitrisiken).

Inhalt der 70-seitigen Arbeit war ein Verfahren zur genaueren Berechnung von Lebensversicherungsprämien. Gompertz hatte dafür die Sterberegister einiger englischer Städte ausgewertet und war dabei auf ein konsistentes Muster der altersspezifischen Sterberaten gestoßen. Die heute als Gompertz-Kurve bezeichnete Funktion zeigt einen exponentiellen Anstieg der Sterberate mit dem Alter. Der Mathematiker folgerte daraus, dass das Sterben, das durch so viele unterschiedliche Zufälle bedingt zu sein scheint, insgesamt einem einfachen und vorhersagbaren Gesetz folgt. Er vermutete, dass diesem einfachen Verlauf der Gesamtsterblichkeit auch einfache Mechanismen zu Grunde liegen sollten.

Es dauerte fast 150 Jahre, bis die allgemeine Gültigkeit der Gompertz-Funktion angezweifelt wurde. In vielen Ländern der Welt stieg die mittlere Lebenserwartung in diesem Zeitraum nämlich stark an, und es standen nun genügend Daten zur Verfügung, um die altersspezifische Sterberate auch für höhere Lebensalter zuverlässiger zu berechnen. Berücksichtigt man in der Analyse – anders, als Gompertz konnte – mehr Hochbetagte, so zeigt sich ein überraschender Trend: Die zunächst exponentiell ansteigende Sterberate flacht mit Erreichen eines Alters von 75 Jahren deutlich ab. Ebenso überraschte die Alternsforscher, dass die dramatischen Unterschiede in der altersspezifischen Sterblichkeit zwischen den verschiedenen Ländern bei den über 75-Jährigen praktisch vollständig verschwinden. Die Aussichten, 75 Jahre alt zu werden, sind zwar für Menschen, die in Bolivien zur Welt kommen, geringer als etwa für Kanadier. Haben sie jedoch dieses Alter erreicht, können auch Bolivianer mit etwa gleicher Wahrscheinlichkeit 90 Jahre alt werden. Der Einfluss von Geburt und Lebensumständen weicht in hohem Alter offenbar allgemeingültigeren Faktoren.

Wohlgemerkt, wir sprechen hier von altersspezifischen Sterberaten, nicht von der kumulativen Sterblichkeit, die schließlich stets 100 Prozent erreicht: Am Ende sterben alle Menschen. Doch gelingt es uns immer besser, das Unvermeidliche aufzuschieben. Demografen, Biologen und Politiker haben noch im vergangenen Jahrhundert immer wieder gemeint, dass Menschen kaum älter als 70, 85 oder gar 100 Jahre alt werden können. Dennoch nimmt das maximal erreichte Lebensalter in vielen Teilen der Welt stetig zu. Jeanne Calment wurde 122 Jahre alt. Die Französin starb 1997 und war in ihrer Heimatstadt Arles als junges Mädchen noch Vincent von Gogh begegnet. Der Trend zur Verlängerung der Lebensspanne wird zwar nicht unbegrenzt anhalten, auch nicht für Optimisten. Doch wird das absolute Limit – oder sogar die beweisbare Existenz einer solchen Grenze – zwischen Demografen und Alternsforschern kontrovers diskutiert.

300 Theorien über den Tod

Diese Auseinandersetzung beruht zum Teil darauf, dass aussagekräftige Zahlen über die Altersklasse um 100 kaum verfügbar sind und man aus zu wenigen Einzelfällen keine belastbaren Schlüsse ziehen kann. Bis vor Kurzem war die Zahl der Menschen im Alter von 95 bis 110 einfach zu gering, Sterberaten für diesen Altersbereich konnten daher nicht zuverlässig geschätzt werden. Zudem ist denkbar, dass Menschen, die über 100 Jahre alt werden, eine kleine Teilmenge der Bevölkerung darstellen, die – auch genetisch – ganz spezielle Eigenschaften aufweist. Die altersspezifische Sterberate dieser Subpopulation, die in den ersten 80 Jahren in der Masse der kurzlebigeren Gesamtbevölkerung untergeht, ist vielleicht bereits über ihre gesamte Lebensspanne geringer und kommt erst dann zum Tragen, wenn die restliche Bevölkerung wegstirbt.

Widmen wir uns jedoch zunächst der näherliegenden Frage, weshalb die meisten Menschen die 100 nicht erreichen. Der russische Biologe Zhores Medvedev hat 1990 über 300 Theorien klassifiziert, die diese Tatsache erklären sollen. Viele dieser Ansätze erscheinen für sich genommen plausibel und erfassen wahrscheinlich irgendeinen relevanten Teilaspekt. Doch ihre schiere Zahl sagt vermutlich ebenso viel über die Komplexität der Sache aus wie über die Schwierigkeit, die Frage der Sterblichkeit vorurteilsfrei zu ergründen. Letztlich sind auch Wissenschaftler nur Menschen.

Theorien zur Erklärung von Todesursachen sind zudem stark vom kulturellen Umfeld beeinflusst, in dem sie entstehen. Ein Beispiel bilden mechanistische Erklärungen. Sie betrachten den menschlichen Körper als komplizierte Maschine, in der viele Komponenten

zusammenwirken. Dieser Vorstellung nach stirbt der Mensch entweder, weil ein besonders wichtiges Aggregat ausfällt (Katastrophenmodell) oder weil mehrere interagierende Komponenten sich abnutzen und nicht mehr ordnungsgemäß zusammenarbeiten (Modell des Systemversagens). Solche Ansätze wirken plausibel, doch sind Daten, die sie stützen würden, nicht leicht zu finden. Katastrophale Ereignisse wie Herzinfarkte oder Schlaganfälle verursachen in den Industrieländern und besonders in den USA zahlreiche Todesfälle. Dies erklärt sich jedoch nicht durch ein altersabhängiges inhärentes Versagen eines Organsystems, da viele solcher Ereignisse zum Beispiel mit Bewegungsmangel zusammenhängen und daher eigentlich vermeidbar wären.

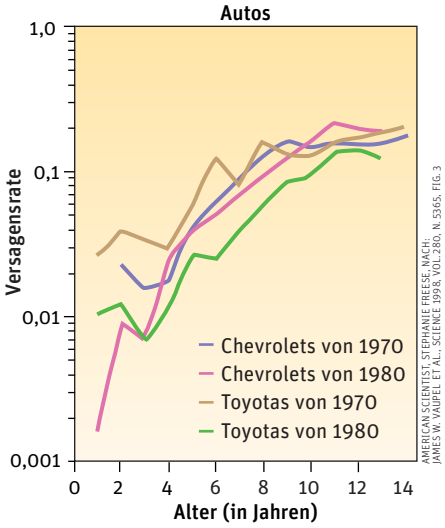
Die Systemtheorie besagt nun, dass komplexe Maschinen versagen, weil mehrere Komponenten zugleich ausfallen. Der menschliche Körper ähnelt in dieser Sicht einem Auto. Die Kurven der altersspezifischen Sterberaten von Automobilen (in diesem Fall heißen sie Ausfallraten), welche die Demografen James W. Vaupel und Cynthia R. Owens von der Duke University in Durham zusammengetragen haben, ähneln verblüffend menschlichen Sterbekurven. Auch hier steigt die Ausfallrate zunächst exponentiell, flacht danach ab und verletzt damit das gompertzsche Gesetz ebenso wie die Sterberate von Hochbetagten.

Gerade bei der Frühsterblichkeit zeigen Menschen und Autos eine geradezu unheimliche Ähnlichkeit: Fabrikationsfehler (bei Maschinen) beziehungsweise Entwicklungsdefekte (bei Organismen) wirken sich in der Regel schon früh aus. Überstehen Mensch oder Auto das erste Jahr, steigt die Wahrscheinlichkeit, auch für längere Zeit weiterzuleben. Diese Ähnlichkeit der Sterblichkeitsprofile könnte uns grundlegende Aspekte beim Versagen komplexer Systeme verraten. Die Stabilität solcher Systeme, seien es Toyotas oder Lebewesen, beruht auf konstruktiv beziehungsweise evolutiv bedingter Redundanz.

Wie jedoch die Gerontologen Leonid und Natalia Gavrilova von der University of Chicago in ihrem Buch »The Biology of Life Span: A Quantitative Approach« (Biologie der Lebensdauer: ein quantitativer Ansatz) darlegen, führt genau jene Redundanz, die es komplexen Systemen ermöglicht, einen stetigen Hagel geringer Schäden zu tolerieren, schließlich zur Kumulation dieser Defekte, die zu Alterung und Versagen führen. Je höher die Redundanz, desto rascher steigt die Sterberate mit zunehmendem Alter an. Genau jene Mechanismen, die unser Überleben in jungen Jahren sicherstellen, beschleunigen also unser Sterben in höherem Alter.

Über zwei Jahrhunderte lang profitierte die Biologie von der descartesschen Sicht auf den menschlichen Körper als Maschine, die materiellen Gesetzmäßigkeiten unterworfen und durch sie erklärbar sei. So verführerisch die Analogie Mensch-Maschine auch sein mag, so verschleiert sie doch einige fundamentale Unterschiede zwischen meinem Auto und mir selbst. Reparaturprozesse zum Beispiel sind für unser Überleben unverzichtbar. Um mein Auto am Laufen zu halten, brauche ich jedoch eine funktionierende Werkstatt, also ein externes System. Organismen hingegen heilen sich weit gehend selbst: Über Hundert der menschlichen Gene dienen der Diagnose und Beseitigung von Schäden an der DNA.

Das Konzept des Körpers als selbstdiagnostizierendes und selbstreparierendes System führte zu einer zweiten Kategorie von Theorien, die den Tod mit einem Versagen der Regenerationsfähigkeit erklären. Obwohl der menschliche Körper eine erstaunliche Vielfalt an Defekten heilen kann, schrumpft diese Fähigkeit zur Selbsterneuerung mit steigendem Alter. Auch der Vorrat an Ausgangsmaterial, also von toti- oder pluripotenten Stammzellen, aus denen sich neues Gewebe bildet, erschöpft sich mit der Zeit, während die Schäden unvermindert weiter kumulieren. Ähnlich wie findige Mechaniker in Kuba Cadillacs aus den 1950er Jahren ohne neue Ersatzteile am Laufen halten, versucht der Körper angesichts des schwindenden Stammzellenvorrats Defekte mit Ausweichmethoden zu kompensieren – ein Kampf, den er letztlich jedoch verliert. Wie die Redundanz wird auch der Reparaturprozess mit der Zeit selbst zum Problem. So können etwa Entzündungen, die nach Gewebeschäden im Rahmen der Heilung auftreten, selbst die Ursache weiterer Schädigungen sein. Unser Körper altert und stirbt, wenn er die für das Überleben erforderlichen Reparaturleistungen nicht mehr erbringen kann.



Die Haltbarkeit von Autos ähnelt verblüffend derjenigen von Menschen. Neuere Autos versagen seltener als ältere, und Fahrzeuge verschiedener Marken zeigen in jungen Jahren verschieden hohe Ausfallraten. Doch wie bei Menschen nähert sich die Haltbarkeit der Autos verschiedener Hersteller mit zunehmendem Alter an.

Robert L. Dorit ist am Smith College in Northampton, Massachusetts, Associate Professor im Department of Biological Sciences. Sein Hauptinteresse gilt der experimentellen Evolution von Molekülen und Bakterien sowie der Entwicklung neuer Antibiotika.

Gavrilov, L. A., Gavrilova, N. S.: The Biology of Life Span. Harwood Academic Publishers, New York 1991.

Dies.: Evolutionary Theories of Aging and Longevity. In: The Scientific World Journal 2, S. 339 – 356, 2002.

Goldsmith, T. C.: www.azinet.com/aging/Aging_Book.html

Gompertz, B.: On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 115, S. 513 – 583, 1825.

Medvedev, Z. A.: An Attempt at a Rational Classification of Theories of Ageing. In: Biological Review of the Cambridge Philosophical Society 65, S. 375 – 398, 1990.

National Center for Health Statistics: www.cdc.gov/nchs/deaths.html

Partridge, L., Fowler, K.: Direct and Correlated Responses to Selection on Age at Reproduction in Drosophila melanogaster. In: Evolution 46, S. 76 – 91, 1992.

Vaupel, J. W.: Trajectories of Mortality at Advanced Ages. In: Wachter, K. W., Finch, C. E. (Hg.): Between Zeus and the Salmon: The Biodemography of Longevity. Committee on Population, National Research Council. National Academies Press, Washington D.C. 1997.

Vaupel, J. W. et al.: Biodemographic Trajectories of Longevity. In: Science 280, S. 855 – 860, 1998.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Eine dritte Kategorie evolutionärer Theorien erklärt Altern und Tod dadurch, dass die natürliche Selektion hauptsächlich im reproduktionsfähigen Alter wirkt und sich gegenüber später auftretenden Defekten weit gehend indifferent verhält. Im fortpflanzungsfähigen Alter unterdrückt die Selektion die Aktivität vieler Gene, die mit Krankheiten assoziiert werden. Nach der Fortpflanzungsphase hingegen, wenn solche Gene nur noch einen geringen Einfluss auf den Reproduktionserfolg eines Individuums haben (jedoch durchaus auf seine Gesundheit), kommen ihre schädlichen Effekte ungehindert zum Tragen. Dieses Szenario würde erklären, weshalb etwa Krebs und Herz-Kreislauf-Erkrankungen im fünften Jahrzehnt des Lebens plötzlich ansteigen. Mutationen, die in jungen Jahren nützlich sind, können sich deshalb evolutionär selbst dann durchsetzen, wenn sie in höherem Alter Probleme verursachen.

Ein weiteres Indiz, das den evolutionären Erklärungsansatz stützt, ist die Beobachtung, dass sich die Lebensspanne von Taufliegen verlängert, wenn man dafür sorgt, dass sie sich erst spät im Leben reproduzieren. Der experimentelle Aufschub der Reproduktion dehnt offenbar die Wirkdauer der Selektion und begünstigt genetische Veränderungen, deren negative Effekte erst spät im Leben zum Tragen kommen. Bei diesen Experimenten nimmt die mittlere Überlebensdauer der Taufliegen in nur wenigen Generationen erkennbar zu. Dennoch summieren sich schädliche Mutationen mit der Zeit unausweichlich zu irreparablen Defekten. Die Kernaussage dieser Theorie besteht darin, dass Altern und Tod dann auftreten, wenn die evolutionäre Selektion unwirksam wird.

Fatalistische Modelle des Sterbens

Eine vierte Kategorie von Hypothesen, die in jüngerer Zeit formuliert wurden, beruht auf molekularen Erklärungsansätzen. Solche so genannten fatalistischen Modelle besagen, dass in unseren Zellen eine Reihe molekularer Uhren ticken, die dazu dienen, die verbleibende Lebensspanne zu messen. Demnach hätte die Evolution den Organismen eine bestimmte Lebensdauer einprogrammiert. Diese Modelle gehen von der grundlegenden Beobachtung aus, dass sich die meisten Zellen von Säugetieren in Kultur höchstens etwa 50-mal teilen, bevor sie absterben. Es ist bekannt, dass Chromosomen bei jeder Zellteilungsrunde ein Stück kürzer werden. Unterschreiten die Chromosomen eine kritische Länge, so stirbt die Zelle.

Allerdings ist bisher noch unklar, wie die Mechanismen des Zelltods mit dem Tod des Gesamtorganismus zusammenhängen. Denn schließlich ist der Körper nicht nur eine Ansammlung vieler Zellen mit unabhängigem Verhalten. Höher organisierte Lebewesen können nämlich diverse Populationen von Stammzellen unterhalten, deren Chromosomen sich nicht verkürzen und die sie bei Bedarf zur Reparatur und Regeneration heranziehen.

In den letzten Jahren hat auch die Idee an Boden gewonnen, dass Langlebigkeit eine Frage von Güterabwägungen ist. Tierexperimente zeigten nämlich, dass Unterernährung und Hunger die Lebenszeit verlängern. Offenbar besteht eine umgekehrte Proportionalität zwischen Ernährung und Aktivität des Stoffwechsels, der schädliche Nebenprodukte erzeugt. Andere Studien zeigten einen umgekehrten Zusammenhang zwischen Fortpflanzungsrate und Langlebigkeit. Energie, die in die Reproduktion investiert wird, kommt ansonsten der Langlebigkeit zugute. Manch einer begreift diese Beobachtungen – vielleicht vorschnell – als Rezept zur Verlängerung des eigenen Lebens. Die angeblichen Überlebensvorteile von Askese erscheinen mir jedoch etwas puritanisch.

Was bedeutet es also, dass so viele unterschiedliche Theorien zur Erklärung des Phänomens Tod existieren? Ich persönlich sehe dies als Symptom eines höchst aktiven, aber noch jungen Forschungsgebiets. Gemeinsam beruhen die vielen konkurrierenden Erklärungsversuche auf der Überzeugung, dass der Tod zwar unvermeidlich, aber nicht unbegreiflich ist. Wenn Gene identifiziert werden, die unsere Lebensdauer beeinflussen, wenn deutlich wird, dass natürlich auch Lebensweise und Umwelt den Tod hinauszögern können, und wenn lebensverlängernde Technologien entwickelt werden, dann steigt damit nur die Faszination des Problems. Aber auch die alternde Gesellschaft der Industrienationen (einschließlich ihrer Wissenschaftler) treibt diese Forschungen voran. Wenn unsere eigentliche Motivation allerdings darin besteht, dem Tod die Macht über den Menschen streitig zu machen, müssen wir über ein rein materielles Verständnis der Biologie des Alterns, der Lebensspanne und des Todes hinausgehen.

Noch heute scheiden die meisten Menschen nicht altersmüde aus der Welt, »ohn' Augen, ohne Zahn, Geschmack und alles«, wie Jacques in Shakespeares »Wie es Euch gefällt« klagt. Vielmehr sterben sie jung an vermeidbaren Ursachen wie Armut oder schlechter medizinischer Betreuung. Betrachtet man die Todesursachen, ohne soziale und ökonomische Umstände einzubeziehen, dann greift man zu kurz und sitzt leicht Fehlschlüssen auf. Zumindest solange ich lebe, wird es vielleicht weniger darum gehen, die Grenzen unserer Biologie zu überwinden, als darum, die Art zu verändern, wie wir leben. ◁

Die Grenzen der QUANTEN

Künftige Rechner, die mit Quantenbits arbeiten, würden zwar einige Spezialaufgaben extrem schnell lösen, doch bei den meisten Problemen wären sie heutigen Computern kaum überlegen. Diese Erkenntnis könnte ein neues physikalisches Grundprinzip offenbaren.

Von Scott Aaronson

Oft wird in populären Artikeln behauptet, Quantencomputer könnten im Prinzip blitzschnell eine besonders schwierige Klasse mathematischer Aufgaben bewältigen – so genannte NP-vollständige Probleme –, an denen heute selbst die besten Computer scheitern. Den Quantencomputern soll dieses Kunststück gelingen, weil sie Hardware enthalten, die alle möglichen Lösungen gleichzeitig zu verarbeiten vermag.

Könnten wir tatsächlich ein Wundergerät bauen, das NP-vollständige Probleme im Nu löst, würden wir in einer anderen Welt leben: Unser Zaubercomputer würde Muster in Börsen- und Wetterdaten aufspüren oder in Aufzeichnungen der Hirnaktivität nach Gesetzmäßigkeiten fahnden. Anders als mit herkömmlichen Computern wäre das Auffinden solcher Muster pure Routine; es würde kein detailliertes Verständnis für das jeweilige Sachgebiet erfordern. Unser magischer Computer würde auch die mathematische Kreativität automatisieren. Bei jedem Heiligen Gral der Mathematik – sei es etwa die goldbachsche oder die riemannsche Vermutung, beide seit über hundert Jahren unbewiesen – könnten wir unseren Rechner einfach anweisen, alle möglichen Beweise und Widerlegungen zu durchforsten, die nicht mehr als, sagen wir, eine Milliarde Symbole umfassen. Wäre ein Beweis noch viel länger, hätten wir vermutlich keine Lust, ihn überhaupt zu lesen.

Wenn die Quantencomputer derart gottgleiche mathematische Fähigkeiten besäßen, müssten wir auf sie wohl noch so lange warten wie auf Überlichtantrieb und Antischwerkraftschild. Doch obwohl wir dem Medienrummel nicht glauben sollten, fände ich es ebenso falsch, die Quanteninformatik als bloße Sciencefiction abzutun. Wir sollten lieber herausfinden, welche Grenzen den Quantencomputern gesetzt sind, und was sie – wenn wir sie erst einmal haben – wirklich können.

Seit der Physiker Richard Feynman vor 26 Jahren erstmals die Idee formulierte, haben Informatiker sehr genaue Vorstellungen über die Probleme entwickelt, für die Quantenrechner gut wären. Soweit wir derzeit wissen, würden sie bei gewissen Spezialaufgaben tatsächlich das Rechentempo drastisch steigern – etwa beim Knacken der kryptografischen Kodes, mit denen finanzielle Transaktionen im Internet verschlüsselt werden. Doch bei anderen Aufgaben wie Schachspielen, Aufstellen von Flugplänen oder mathematischen Beweisen dürften Quantencomputer an die gleichen algorithmischen Grenzen stoßen wie heutige Rechner. Diese prinzipiellen Schranken gelten ganz unabhängig von den prak-

COMPUTER

ALLE ILLUSTRATIONEN DES ARTIKELS: DUSAN PETRICIC

Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter www.spektrum.de/talk

tischen Schwierigkeiten, einen Quantencomputer zu bauen; Letztere haben vor allem mit der so genannten Dekohärenz zu tun, der unerwünschten Wechselwirkung zwischen dem Quantencomputer und seiner Umgebung. Die mathematischen Grenzen der Programmierung bleiben aber selbst dann wirksam, wenn den Physikern ein Quantencomputer gelingt, der keinerlei Dekohärenz aufweist.

Was heißt schwierig?

Warum löst ein Quantencomputer nur bestimmte Aufgaben – zum Beispiel Kodeknacken – viel schneller, tut sich aber bei anderen nicht besonders hervor? Die Antwort führt uns tief in die Grundlagen der Computerwissenschaft. Den Informatiker interessiert vor allem, wie steil die Rechenzeit mit dem Umfang des Problems ansteigt. Diese Zeit wird durch die Zahl der elementaren Rechenschritte gemessen, die der Algorithmus braucht, um zu einer Lösung zu gelangen. Zum Beispiel brauchen wir, um zwei n-stellige Zahlen nach der aus dem Schulunterricht bekannten Methode miteinander zu multiplizieren, eine Zeit, die mit dem Quadrat der Ziffernanzahl wächst, also mit n^2. Man sagt, der Zeitaufwand ist ein Polynom von n. Doch um eine Zahl in ihre Primfaktoren zu zerlegen, benötigt man selbst mit den besten bekannten Methoden eine Zeit, die exponentiell mit der Ziffernanzahl wächst – genauer gesagt, mit 2 hoch dritte Wurzel aus n. Somit ist Faktorisieren schwieriger als Multiplizieren –, und wenn wir mit Tausenden von Stellen arbeiten, fällt dieser Unterschied viel stärker ins Gewicht als der zwischen einem Commodore 64 und einem Supercomputer.

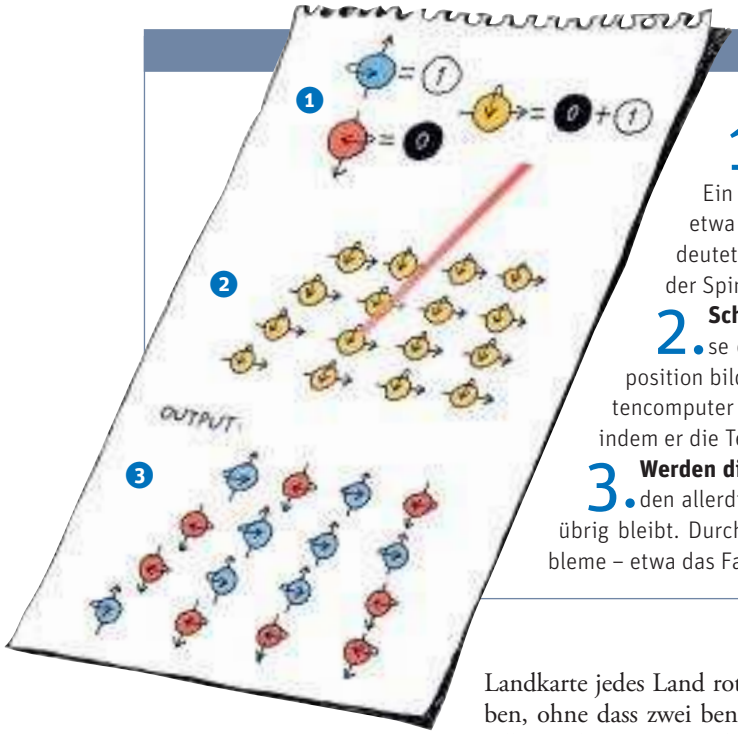
Für die Art von Problemen, die ein Computer auch für große n in vernünftiger Zeit zu lösen vermag, gibt es einen Algorithmus, dessen Anzahl von Schritten mit n hoch einem festen Exponenten wächst, zum Beispiel n, n^2 oder $n^{2,5}$. Informatiker nennen einen solchen Algorithmus effizient, und mit einem effizienten Algorithmus lösbare Probleme gehören zur Komplexitätsklasse P, wobei P für »Polynomialzeit« steht.

Hier ein einfaches Beispiel für ein Problem der Klasse P: Gegeben sei eine Straßenkarte; ist jede Stadt von jeder anderen aus erreichbar? Bei einigen P-Problemen ist die effiziente Lösung nicht so offensichtlich: Gegeben sei eine ganze Zahl; ist sie eine Primzahl wie 13 oder zusammengesetzt wie 12? Gegeben sei eine Liste, die angibt, welche Männer und Frauen heiraten wollen; lässt sich für alle ein heiratswilliger Partner finden?

Doch angenommen, gegeben seien die Abmessungen unterschiedlicher Kisten, und Sie möchten sie in Ihrem Kofferraum verstauen. Oder angenommen, Sie wollen auf einer

In Kürze

- **Quantencomputer** sollen mit Hilfe der seltsamen Regeln der Quantenmechanik Aufgaben lösen, die jeden herkömmlichen Computer überfordern.
- Für spezielle Probleme wie **das Zerlegen ganzer Zahlen in Faktoren** eignen sich Quantencomputer sehr viel besser als heutige Rechner. Doch bei den meisten Aufgaben wären sie klassischen Computern nicht besonders überlegen.
- **Exotische Varianten physikalischer Gesetze** würden zwar Rechengeräte ermöglichen, die große Klassen schwieriger Probleme effizient lösen, doch solche Umbrüche in der Physik sind unwahrscheinlich. Vielleicht sollte die Unmöglichkeit, diese Probleme effizient zu lösen, als physikalisches Grundprinzip anerkannt werden.



Kleines Quantencomputer-Einmaleins

1. **Künftige Quantenrechner** würden an Stelle herkömmlicher Bits, die nur die Werte 0 oder 1 annehmen, Quantenbits verwenden. Ein solches Qubit kann durch ein Teilchen mit Spin repräsentiert werden, etwa ein Elektron. Spin aufwärts (blau) bedeutet 1, Spin abwärts (rot) bedeutet 0. Außerdem gibt es Superpositionen – Quantenzustände, bei denen der Spin gleichzeitig nach oben und unten weist (gelb).

2. **Schon Superpositionszustände** weniger Teilchen bergen auf diese Weise eine enorme Informationsmenge: 1000 Teilchen können eine Superposition bilden, die jede Zahl von 1 bis 2^{1000} (rund 10^{300}) repräsentiert. Ein Quantencomputer würde all diese Zahlen gleichzeitig verarbeiten – beispielsweise, indem er die Teilchen mit Laserpulsen beschießt.

3. **Werden die Teilchenzustände** am Ende der Berechnung gemessen, verschwinden allerdings alle 10^{300} parallelen Zustände bis auf einen einzigen, der zufällig übrig bleibt. Durch geschicktes Manipulieren der Teilchen lassen sich bestimmte Probleme – etwa das Faktorisieren einer großen Zahl – dennoch sehr schnell lösen.

Landkarte jedes Land rot, blau oder grün färben, ohne dass zwei benachbarte Länder dieselbe Farbe tragen. Oder gegeben seien mit Brücken verbundene Inseln, und Sie suchen eine Route, auf der Sie jede Insel nur ein einziges Mal besuchen. Zwar kennt man für diese Probleme Algorithmen, die etwas besser sind als bloßes Ausprobieren jeder möglichen Lösung – aber man kennt keinen Algorithmus, der prinzipiell besser wäre. Jeder bekannte Algorithmus braucht eine Zeit, die exponentiell mit der Größe der Aufgabe wächst.

Wie sich zeigt, haben die drei eben genannten Probleme eine sehr interessante Eigenschaft: Sie sind eigentlich alle dasselbe Problem, denn ein effizienter Algorithmus für eines von ihnen würde auch für alle anderen effiziente Verfahren liefern. Das fanden Stephen A. Cook von der University of Toronto (Kanada), Richard Karp von der University of California in Berkeley und Leonid Levin, jetzt an der Boston University tätig, in den 1970er Jahren heraus, als sie die Theorie der NP-Vollständigkeit formulierten.

NP steht für nichtdeterministische Polynomialzeit. Im Grunde ist NP die Klasse von Problemen, für die eine Lösung, ist sie erst einmal gefunden, in Polynomialzeit – wie n^2 und so fort – als korrekt erkannt werden kann, obwohl die Lösung selbst schwer zu finden sein mag. Bei einer Karte mit Tausenden von Inseln und Brücken dauert es vielleicht Jahre, eine Route zu entdecken, die jede Insel genau einmal berührt. Doch wenn Ihnen jemand eine Route zeigt, lässt sich leicht überprüfen, ob sie das Problem löst. Eine Aufgabe mit dieser Eigenschaft heißt NP-Problem. Die Klasse NP enthält unzählige Probleme von praktischem Interesse. Übrigens sind alle P-Probleme auch NP-Probleme, oder anders gesagt: Die Klasse P ist in der Klasse NP enthalten. Wenn man ein Problem schnell zu lösen vermag, kann man auch die Lösung schnell verifizieren.

Am schwierigsten unter den NP-Problemen sind die NP-vollständigen. Das sind diejenigen mit der von Cook, Karp und Levin entdeckten Eigenschaft: Fände man einen effizienten Algorithmus für eines von ihnen, ließen sich damit – entsprechend angepasst – auch alle anderen NP-Probleme lösen.

Ein effizienter Algorithmus für ein NP-vollständiges Problem würde dem gegenwärtigen Bild der Klassen P, NP und NP-vollständig radikal den Boden entziehen, denn dann wäre jedes NP-Problem – inklusive jedes NP-vollständigen – in Wahrheit ein P-Problem. Mit anderen Worten, die Klasse P wäre gleich der Klasse NP, das hieße P = NP.

Was Quanten können

Gibt es einen solchen Algorithmus? Ist P wirklich gleich NP? Das ist eine echte Preisfrage – das Clay Math Institute in Cambridge (Massachusetts) hat dafür eine Million Dollar Belohnung ausgesetzt –, die sogar in den »Simpsons« und anderen US-Fernsehserien erwähnt wurde.

Seit die Frage formuliert wurde, sind 50 Jahre vergangen, ohne dass jemand einen effizienten Algorithmus für ein NP-vollständiges Problem gefunden hat. Darum glauben heute fast alle Informatiker, dass P nicht gleich NP ist, oder P ≠ NP. Allerdings wissen wir weder, warum das so ist, noch können wir es streng beweisen.

Wenn wir einräumen, dass P ≠ NP, dann bleibt nur eine Hoffnung, NP-vollständige Probleme in Polynomialzeit zu lösen: Wir

GEDANKENZONEN

Während in unserer Welt überall dieselben rechnerischen Grenzen gelten, ist die Galaxis in Vernor Vinges 1992 erschienenem **Sciencefiction-Roman** »A fire upon the deep« (auf Deutsch als »Ein Feuer auf der Tiefe« erhältlich) in konzentrische »Gedankenzonen« unterteilt, die unterschiedliche rechnerisch-technische Beschränkungen aufweisen.

In den »**gedankenleeren Tiefen**«, nahe dem galaktischen Kern, versagen selbst einfache Automaten und Denkvorgänge.

Die »**langsame Zone**« enthält die Erde und ist auf die uns bekannte Weise rechnerisch begrenzt.

Im »**Jenseits**« produzieren fast empfindungsfähige ▶

müssen den Begriff Computer erweitern. Auf den ersten Blick scheint die Quantenmechanik das Gewünschte zu liefern. Sie ermöglicht das Speichern und Verarbeiten einer riesigen Datenmenge in den Zuständen relativ weniger Teilchen. Angenommen, wir haben 1000 Teilchen, deren jedes, wenn es gemessen wird, entweder »Spin aufwärts« oder »Spin abwärts« anzeigt. Für unsere Zwecke ist unwichtig, was es bedeutet, wenn ein Teilchenspin nach oben oder nach unten weist. Es kommt nur darauf an, dass es eine Teilcheneigenschaft gibt, die bei der Messung einen von zwei möglichen Werten hat.

Um den Quantenzustand dieser Teilchenmenge zu beschreiben, muss man jedem möglichen Messergebnis eine Zahl zuweisen. Diese Zahlen heißen Amplituden der möglichen Resultate und hängen mit der Wahrscheinlichkeit jedes Resultats zusammen – doch anders als Wahrscheinlichkeiten können Quantenamplituden positiv oder negativ sein; eigentlich sind sie sogar komplexe Zahlen. Zum Beispiel wird eine Amplitude für die Möglichkeit benötigt, dass alle 1000 Teilchen Aufwärts-Spin anzeigen, eine weitere dafür, dass die Spins der ersten 500 Teilchen aufwärts- und die übrigen abwärtsweisen, und so fort. Es gibt 2^{1000} oder rund 10^{300} mögliche Resultate, und entsprechend viele Zahlen werden gebraucht – mehr als Atome im sichtbaren Universum! Quantenphysiker drücken das so aus: Die 1000 Teilchen sind in einer Superposition dieser 10^{300} Zustände.

Das heißt, mit unseren 1000 Teilchen lassen sich zugleich 10^{300} Zahlen speichern. Wenn wir nun mit diesen Teilchen und einigen Hilfsteilchen verschiedene Operationen ausführen – sie beispielsweise mit einer Folge von Laserpulsen oder Radiowellen beschießen –, können wir einen Algorithmus ausführen, der sämtliche 10^{300} Zahlen, von denen jede eine potenzielle Lösung darstellt, gleichzeitig verarbeitet. Könnten wir danach den Quantenzustand der Teilchen exakt auslesen, besäßen wir wirklich einen magischen Computer: Er wäre fähig, 10^{300} mögliche Lösungen eines Problems zu überprüfen, und am Ende würden wir schnell die richtige herausfinden.

Leider hat die Sache einen Pferdefuß. Um den Endzustand auszulesen, müssen wir die Teilchen messen, und nach den Regeln der Quantenphysik verwirklicht die Messung nur eine der 10^{300} Möglichkeiten – alle anderen verschwinden. Anscheinend sind wir nicht besser dran als mit einem klassischen Computer, auf dem wir eine zufällig ausgewählte Lösungsmöglichkeit ausprobieren. In beiden Fällen wissen wir am Ende nur über eine einzige mögliche Lösung Bescheid.

Zum Glück bietet die Quantenphysik ein paar spezielle Tricks. Amplituden können einander auslöschen, wenn sich eine positive mit einer negativen überlagert; man spricht dann von destruktiver Interferenz. Ein guter Quantencomputer-Algorithmus würde sicherstellen, dass Rechenwege, die zu einer falschen Lösung führen, sich auf diese Weise auslöschen. Er würde auch garantieren, dass alle Wege, die zu einer korrekten Lösung führen, Amplituden gleichen Vorzeichens haben; das gibt konstruktive Interferenz und erhöht damit die Wahrscheinlichkeit, dass sie am Ende beim Messen der Teilchen gefunden werden.

Für welche Rechenprobleme können wir solche Interferenzen organisieren, und zwar so, dass wir weniger Schritte brauchen als auf einem klassischen Lösungsweg?

1994 fand Peter Shor, derzeit am Massachusetts Institute of Technology (MIT), erstmals einen Quantenalgorithmus, der das Lösen eines praktischen Problems drastisch zu beschleunigen vermag. Insbesondere zeigte

► Nanotechnik-Fabriken Wunderdinge wie Antischwerkraftgewebe, und Hypercomputer ermöglichen Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit.

Das »**Transzens**« wird von gefährlichen, gottähnlichen Hyperintelligenzen bevölkert, deren Techniken und Denkprozesse für tiefer stehende Wesen unergründlich bleiben.

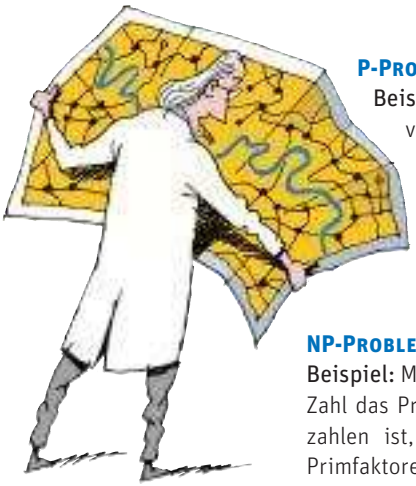
Die gute Nachricht

Selbst ein großer, perfekter Quantencomputer würde vermutlich an ähnliche prinzipielle Grenzen stoßen wie heutige klassische Rechner. Dennoch sollten sich die Physiker jede Mühe geben, wenigstens einfache Prototypen eines Quantencomputers zu bauen. Dafür gibt es vier gute Gründe:

- Falls Quantencomputer jemals funktionieren, wird ihre Hauptaufgabe wohl weniger das Kodeknacken sein, vielmehr etwas so Offensichtliches, dass es kaum erwähnt wird: die rechnerische Simulation der Quantenphysik. Das ist ein fundamentales Problem in Teilchenphysik, Chemie und Nanotechnik; sogar für Teilfortschritte wurden schon Nobelpreise verliehen.
- Wenn die Transistoren in Mikrochips sich atomaren Größenordnungen nähern, werden die Ideen der Quanteninformatik auch für klassische Computer relevant.
- Experimente mit Quantencomputern richten die Aufmerksamkeit auf die seltsamsten Eigenschaften der Quantenphysik. Statt diese Rätsel unter den Teppich zu kehren, werden wir hoffentlich gezwungen sein, an ihrer Lösung zu arbeiten.
- Durch die Quanteninformatik wird die Quantenmechanik selbst auf die denkbar strengste Probe gestellt. Das vielleicht faszinierendste Ergebnis wäre die Entdeckung eines Prinzips, wonach Quantencomputer prinzipiell nicht möglich sind. Ein solcher Fehlschlag würde unser physikalisches Weltbild umwälzen, während ein Erfolg es nur bestätigen würde.

Wo klassische Computer versagen

Informatiker klassifizieren Probleme danach, wie viele Rechenschritte die Lösung einer großen Aufgabe mit den besten verfügbaren Algorithmen erfordert. Die Probleme werden nach ihrer Schwierigkeit in große, einander überlappende Klassen eingeteilt. Drei besonders wichtige Klassen sind unten angeführt. Entgegen einem verbreiteten Mythos sind Quantencomputer nach bisheriger Kenntnis nicht fähig, die sehr schwierige Klasse der NP-vollständigen Probleme effizient zu lösen.



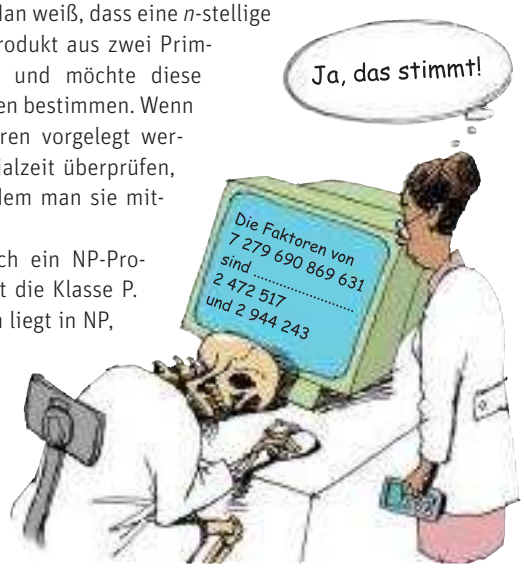
P-Probleme: in Polynomialzeit effizient lösbar

Beispiel: Gegeben sei eine Karte mit n Städten. Kann man von jeder Stadt zu jeder anderen gelangen? Für große n wächst die Anzahl der erforderlichen Rechenschritte proportional zu n^2, einem Polynom. Da Polynome relativ langsam mit n wachsen, können Computer selbst große P-Probleme in vernünftiger Zeit lösen.

NP-Probleme: Lösungen leicht überprüfbar

Beispiel: Man weiß, dass eine n-stellige Zahl das Produkt aus zwei Primzahlen ist, und möchte diese Primfaktoren bestimmen. Wenn zwei Faktoren vorgelegt werden, kann man in Polynomialzeit überprüfen, ob sie die Lösung sind, indem man sie miteinander multipliziert.

Jedes P-Problem ist auch ein NP-Problem: Die Klasse NP enthält die Klasse P. Das Faktorisierungsproblem liegt in NP, aber vermutlich außerhalb von P, da kein Algorithmus für Standardcomputer bekannt ist, der es in einer polynomialen Anzahl von Rechenschritten zu lösen vermag. Vielmehr wächst die Anzahl der Schritte exponentiell mit n.



NP-vollständige Probleme: Eine effiziente Lösung eines dieser Probleme würde eine effiziente Lösung aller anderen liefern

Beispiel: Lässt sich eine vorgegebene Karte mit nur drei Farben so kolorieren, dass benachbarte Länder stets unterschiedlich gefärbt sind? Hätte man einen Lösungsalgorithmus für dieses Problem, könnte man daraus die Lösung aller anderen NP-Probleme mit ungefähr gleich vielen Schritten entwickeln – etwa für das obige Faktorisierungsproblem oder für die Aufgabe, n unterschiedliche Kisten in einen Kofferraum vorgegebener Größe zu packen. NP-vollständige Probleme sind die schwierigsten NP-Probleme: Kein bekannter Algorithmus vermag ein NP-vollständiges Problem effizient zu lösen.

Shor, wie ein Quantencomputer eine n-stellige Zahl so faktorisieren kann, dass die Anzahl der Rechenschritte nur mit rund n^2 zunimmt – das heißt in Polynomialzeit. Wie bereits erwähnt braucht der beste bekannte Algorithmus für klassische Computer eine exponentiell wachsende Anzahl von Schritten.

Der Trick mit der Blackbox

Somit lässt sich zumindest bei der Faktorzerlegung das Rechentempo mit Quantenmethoden gegenüber klassischen Algorithmen exponentiell beschleunigen. Doch entgegen einem verbreiteten Missverständnis ist das Faktorisierungsproblem mit ziemlicher Sicherheit nicht NP-vollständig. Für seinen Algorithmus nutzte Shor bestimmte Eigenschaften zusammengesetzter Zahlen und ihrer Faktoren, die besonders leicht die konstruktiven und destruktiven Interferenzen erzeugen, mit denen ein Quantencomputer arbeitet. Den NP-vollständigen Problemen scheinen diese speziellen Eigenschaften zu fehlen. Bis heute haben Forscher nur wenige andere Quantenalgorithmen gefunden, die einen Übergang von exponentieller zu polynomialer Rechenzeit versprechen.

Also bleibt die Frage: Gibt es einen effizienten Quantenalgorithmus für NP-vollständige Probleme? Trotz eifrigen Bemühens wurde kein solcher Algorithmus gefunden – allerdings auch kein Beweis dafür, dass er nicht existiert. Das ist kein Wunder, denn wir können ja nicht einmal beweisen, dass es für NP-vollständige Probleme keinen klassischen Lösungsalgorithmus in Polynomialzeit gibt.

Wir können nur sagen, dass ein Quantenalgorithmus, der NP-vollständige Probleme effizient zu lösen vermag, wie Shors Algorithmus die Struktur des Problems ausnutzen muss – allerdings in einer Weise, die über heutige Verfahren weit hinausgeht. Man kann keine exponentielle Beschleunigung erhalten, indem man das Problem als strukturlose »Blackbox« behandelt, die aus einer exponentiellen Anzahl parallel zu prüfender Lösungen besteht. Dennoch lässt sich diesem Blackbox-Ansatz ein gewisser Tempozuwachs abluchsen, und Computerwissenschaftler haben ermittelt, wie gut – und wie begrenzt – diese Beschleunigung ist. Der Algorithmus, der diesen Tempogewinn erzeugt, ist der zweite wichtige Quantenalgorithmus.

Um den Blackbox-Ansatz zu veranschaulichen, nehmen wir an, Sie stehen vor einem schwierigen Problem und sind darauf angewiesen, irgendeine Lösung zu erraten und auszuprobieren. Angenommen, es gibt S mögliche Lösungen, wobei S exponentiell mit der Problemgröße n anwächst. Vielleicht haben Sie Glück und finden die richtige Lösung schon beim ersten Versuch, aber schlimmsten-

falls brauchen Sie S Versuche, also im Durchschnitt $S/2$.

Nun nehmen wir an, Sie könnten alle möglichen Lösungen als Quantensuperposition testen. 1996 entwickelte Lov Grover von den Bell Laboratories einen Algorithmus, der in einem solchen Szenario die korrekte Lösung in nur rund $\sqrt{S}$ Schritten findet. Eine Beschleunigung von $S/2$ zu $\sqrt{S}$ ist für einige Probleme ein nützlicher Fortschritt: Wenn es eine Million mögliche Lösungen gibt, brauchen Sie nur 1000 Schritte statt 500 000. Doch die Quadratwurzel verwandelt exponentielle Zeit nicht in Polynomialzeit, sondern erzeugt nur einen kleineren Exponenten. Außerdem ist Grovers Algorithmus für die Blackbox-Suche nicht zu überbieten: Schon 1994 hatten Forscher nachgewiesen, dass jeder Blackbox-Algorithmus mindestens $\sqrt{S}$ Schritte benötigt.

Wie sich in den letzten zehn Jahren gezeigt hat, gelten ähnlich mäßige Tempogewinne nicht nur für das Durchsuchen einer Liste, sondern auch für viele andere Probleme, etwa das Stimmenzählen bei Wahlen, das Auffinden des kürzesten Wegs auf einer Karte oder Strategiespiele wie Schach und Go. Als besonders schwierig erwies sich das so genannte Kollisionsproblem – die Aufgabe, in einer langen Liste zwei Elemente zu finden, die identisch sind oder »kollidieren«. Gäbe es dafür einen schnellen Quantenalgorithmus, so würden in einer Welt mit Quantencomputern viele Grundbausteine des sicheren elektronischen Geldverkehrs nutzlos.

Das Durchforsten einer Liste nach einem bestimmten Element gleicht der sprichwörtlichen Suche nach der Nadel im Heuhaufen. Hingegen ähnelt das Aufspüren einer Kollision der Suche nach zwei identischen Stück Heu; dadurch erhält das Problem eine Struktur, die ein Quantencomputer vielleicht nutzen kann. Ich zeigte aber 2002, dass im Blackbox-Modell jeder Quantenalgorithmus für die Lösung des Kollisionsproblems exponentielle Zeit braucht.

Gewiss schließen diese Blackbox-Grenzen nicht aus, dass künftig effiziente Quantenalgorithmen für NP-vollständige oder noch schwierigere Probleme entdeckt werden. Doch falls solche Algorithmen existieren, müssen sie die Problemstruktur in einer völlig neuartigen Weise nutzen – genau wie effiziente klassische Algorithmen für dieselben Probleme. Quan-

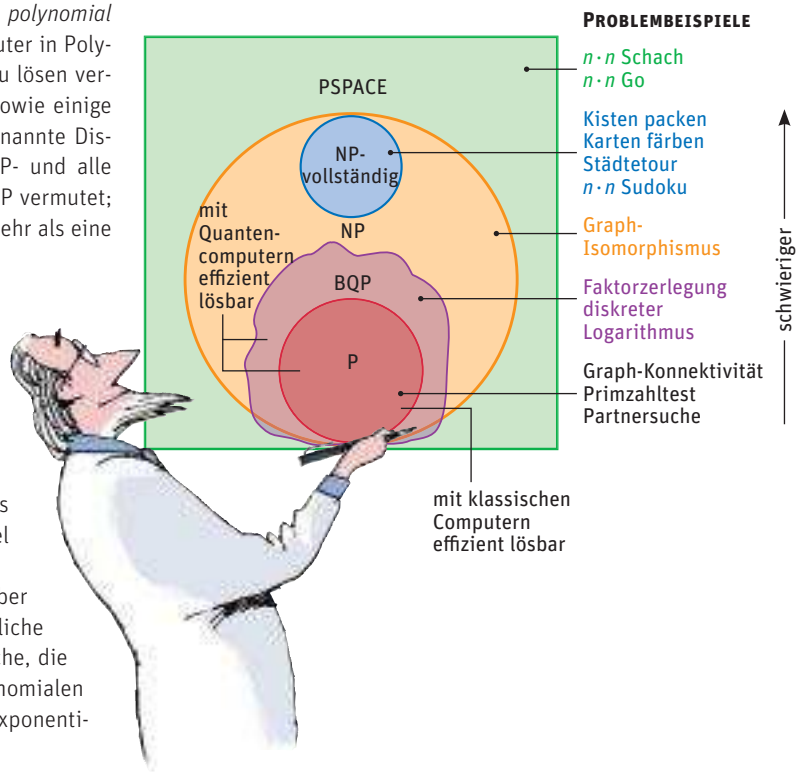
Wo Quantencomputer hingehören

Die Grafik zeigt, wie die mit Quantencomputern effizient lösbare Problemklasse BQP mit anderen Rechenproblemen zusammenhängt. Die wellige Grenze soll andeuten, dass BQP nicht genau in die anderen Klassen passt.

Das Kürzel BQP steht für *bounded-error quantum polynomial time* und bezeichnet Probleme, die ein Quantencomputer in Polynomialzeit mit begrenzter Fehlerwahrscheinlichkeit zu lösen vermag. Die BQP-Klasse enthält sämtliche P-Probleme sowie einige NP-Probleme wie die Faktorzerlegung und das so genannte Diskreter-Logarithmus-Problem. Die meisten übrigen NP- und alle NP-vollständigen Probleme werden außerhalb von BQP vermutet; das heißt, selbst ein Quantencomputer würde dafür mehr als eine polynomiale Anzahl von Schritten benötigen.

Außerdem ragt BQP vielleicht über NP hinaus. Das bedeutet, Quantencomputer könnten bestimmte Probleme schneller lösen, als herkömmliche Computer schon allein zum Prüfen der Lösung brauchen. Wie erwähnt vermag ein herkömmlicher Computer zwar die Lösung eines NP-Problems effizient zu prüfen, kann aber nur P-Probleme effizient lösen. Bis heute ist allerdings noch kein überzeugendes Beispiel für ein solches Problem bekannt.

Immerhin wissen Informatiker, dass BQP nicht über die Klasse PSPACE hinausreichen kann, die auch sämtliche NP-Probleme einschließt. PSPACE-Probleme sind solche, die ein herkömmlicher Computer schon mit einer polynomialen Menge an Speicher, aber möglicherweise nur mit exponentiellem Rechenaufwand bewältigt.



tentricks allein genügen nicht. Auf Grund dieser Erkenntnis vermuten viele Informatiker nicht nur, dass N ≠ NP, sondern auch, dass Quantencomputer NP-vollständige Probleme nicht in Polynomialzeit zu lösen vermögen.

Nach heutigem Wissensstand kommt nach den Quantencomputern nichts mehr – das heißt, sie sind der allgemeinste Computertyp, der mit geltenden physikalischen Gesetzen vereinbar ist. Doch da die Physiker noch keine endgültige Theorie besitzen, lässt sich nicht ausschließen, dass eine künftige Physik die Mittel zur effizienten Lösung NP-vollständiger Probleme liefern wird. Wie nicht anders zu erwarten, wird bereits über Rechner spekuliert, gegen die ein Quantencomputer so simpel aussieht wie ein Getränkeautomat. Freilich beruhen sie alle auf spekulativen Veränderungen der physikalischen Gesetze.

Hoffnung auf »neue Physik«

Eine zentrale Eigenschaft der Quantenmechanik ist ihre mathematische Linearität. 1998 zeigten Daniel S. Abrams und Seth Lloyd, damals beide am MIT: Fügt man den Gleichungen der Quantenmechanik einen kleinen nichtlinearen Term hinzu, können Quantencomputer NP-vollständige Probleme effizient lösen. Allerdings könnte man mit einem solchen nichtlinearen Term auch die heisenbergsche Unschärferelation verletzen und Signale mit Überlichtgeschwindigkeit senden. Wie Abrams und Lloyd betonen, liefern ihre Resultate vielleicht nur einen guten Grund, warum die Quantenmechanik linear ist.

Ein anderer spekulativer Computertyp soll ungeheure Rechenkräfte entfalten, indem er unendlich viele Schritte in endlicher Zeit ausführt. Leider zerfällt die Zeit nach gängiger physikalischer Vorstellung nahe der so genannten Planckzeit (10^{-43} Sekunden) in ein Meer von Quantenfluktuationen – eine Art Schaum an Stelle einer gleichförmig glatten Linie. Das dürfte dieser Rechenmaschine den Boden entziehen.

Wenn die Zeit nicht beliebig fein unterteilt werden kann, bescheren uns vielleicht Zeitreisen eine effiziente Lösung NP-vollständiger Probleme. Physiker, die sich damit befassen, sprechen nicht von Zeitmaschinen, sondern von geschlossenen zeitartigen Kurven, kurz CTCs *(closed timelike curves)*. Im Wesentlichen ist eine CTC ein Weg durch Raum und Zeit, auf dem Materie oder Energie sich selbst in der Vergangenheit trifft und eine geschlossene Schleife bildet. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist unklar, ob CTCs existieren können, aber das muss uns nicht hindern, nach den Konsequenzen für die Computerwissenschaft zu fragen.

Wie man mit einer CTC eine Rechnung beschleunigen kann, liegt auf der Hand: Programmieren Sie Ihren Computer so, dass er das Problem irgendwann löst, und schicken Sie dann die Lösung an Sie selbst in eine Zeit zurück, bevor der Computer zu rechnen begann. Leider funktioniert diese einfache Idee nicht, denn sie ignoriert das berühmte Großvater-Paradoxon: Wenn man durch die Zeit zurückreist, um den eigenen Großvater zu töten, wird man nie geboren, reist also auch nie in die Vergangenheit, wodurch der Großvater am Leben bleibt und Kinder hat, und später wird man doch geboren, und so weiter. Was würde in unserem Beispiel geschehen, wenn man den Computer ausschaltet, nachdem man die Lösung aus der Zukunft erhalten hat?

Im Jahr 1991 definierte der Physiker David Deutsch von der University of Oxford ein Berechnungsmodell mit CTCs, das diese Schwierigkeit umgeht. Deutsch zufolge sorgt die Natur dafür, dass Ereignisse auf geschlossenen Zeitschleifen niemals Paradoxien erzeugen; darum lässt sich ein Computer programmieren, der innerhalb einer CTC kreist, um schwierige Probleme zu lösen.

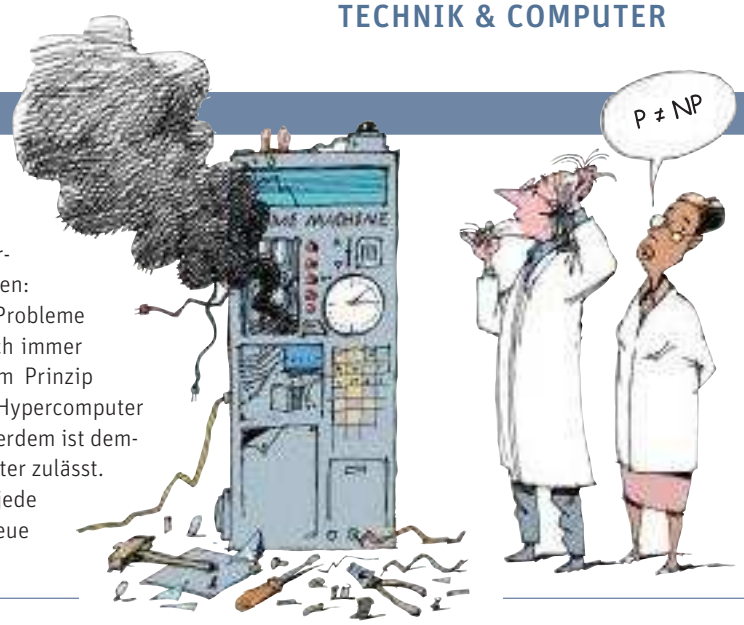
In der Tat könnten wir mit einer CTC nicht nur NP-Probleme effizient lösen, sondern sogar Probleme einer offenbar größeren Klasse namens PSPACE. Sie umfasst Aufgaben, für die ein herkömmlicher Computer

Hypercomputer dank exotischer Physik?

Zwar werden Quantencomputer NP-vollständige Probleme vermutlich nicht schnell lösen, aber mit Hilfe hypothetischer physikalischer Prozesse lassen sich Rechengeräte ausmalen, die dies und noch viel mehr können. Mittels Zeitreisen können alle PSPACE-Probleme effizient gelöst werden, darunter schwierigere als die NP-vollständigen Probleme – etwa perfektes Schach auf beliebig großen Brettern. Das Verwenden von Zeitreisen würde zwar nicht einfach darin bestehen, einen Computer in ferner Zukunft eine lange Berechnung beenden zu lassen und dann die Lösung in die Gegenwart zurückzuschicken, doch ähnliche Zeitschleifen würden ins Spiel kommen. Das Problem ist nur, dass die hypothetischen Prozesse die bekannten physikalischen Gesetze verletzen.

Ein neues physikalisches Prinzip?

Da offenbar zur Konstruktion eines Computers, der NP-vollständige Probleme schnell zu bewältigen vermag, höchst unplausible physikalische Vorgänge – zum Beispiel Zeitreisen – erforderlich sind, liegt es näher, ein neues Prinzip zu formulieren: »NP-vollständige Probleme sind schwierig.« Das heißt, solche Probleme lassen sich mit realen Computern nicht effizient lösen, wie auch immer die Gesetze der Physik letztlich aussehen mögen. Aus diesem Prinzip folgt, dass Zeitreisen unmöglich sind, denn sonst könnte man Hypercomputer für die effiziente Lösung NP-vollständiger Probleme bauen. Außerdem ist demnach überhaupt jede Theorie ausgeschlossen, die solche Computer zulässt. Das Prinzip ähnelt den Hauptsätzen der Thermodynamik, die jede Art von Perpetuum mobile verbieten und dadurch der Physik neue Erkenntnisse beschert haben.



eine polynomiale Menge an Speicherplatz braucht, aber möglicherweise eine exponentielle Menge an Zeit. Ich musste bisher die polynomiale Speicherbeschränkung nicht eigens erwähnen, weil es bei P- und NP-Problemen keinen Unterschied macht, ob der Computer auf mehr als polynomialen Speicherplatz zugreifen kann. Eine CTC würde Raum und Zeit als Ressourcen der Berechnung praktisch austauschbar machen. Wie John Watrous von der University of Waterloo in Ontario (Kanada) und ich kürzlich zeigten, vermag ein Quantencomputer, den man an Stelle eines herkömmlichen Rechners in eine CTC schickt, auch nur höchstens PSPACE-Probleme effizient zu lösen. Mit anderen Worten: Wenn CTCs existieren, dann sind Quantencomputer nicht mächtiger als klassische.

Des Computers Achillesferse

Die Physiker wissen nicht, ob künftige Theorien irgendeine dieser exotischen Maschinen zulassen werden. Doch ohne unser Unwissen zu leugnen, wollen wir es unter einem positiven Aspekt betrachten. Kehren wir den Spieß um: Statt von physikalischen Theorien auf deren computertechnische Anwendungen zu schließen, wollen wir annehmen, dass NP-vollständige Probleme prinzipiell schwierig sind, und dann die Konsequenzen dieser Annahme für die Physik untersuchen. Könnten wir beispielsweise NP-vollständige Probleme mit CTCs effizient lösen, so würde aus der Annahme, dass NP-vollständige Probleme unlösbar sind, die Unmöglichkeit von CTCs folgen.

Manchen wird dieser Ansatz allzu dogmatisch erscheinen. Für mich unterscheidet er sich nicht davon, den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik oder die Unmöglichkeit von Kommunikation mit Überlichtgeschwindigkeit zu postulieren – zwei frühere Einschränkungen des technisch Machbaren, die mit der Zeit zu physikalischen Prinzipien erhoben wurden. Gewiss, der Zweite Hauptsatz könnte schon morgen experimentell widerlegt werden; doch bis dahin finden es die Physiker weitaus hilfreicher, ihn für richtig zu halten und mit seiner Hilfe alles Mögliche von Automotoren bis zu Schwarzen Löchern zu analysieren. Ich sage voraus, dass man die Schwierigkeit der NP-vollständigen Probleme eines Tages genauso interpretieren wird: als fundamentales Prinzip, das eine wichtige Eigenschaft unseres Universum beschreibt. Welche theoretischen Erkenntnisse oder praktischen Anwendungen aus einem solchen Grundprinzip künftig hervorgehen mögen, wissen wir nicht.

Einstweilen sollten wir von Quantencomputern keine Wunderdinge erwarten. Manchen wird die vermeintliche Beschränktheit solcher Geräte enttäuschen, doch sie hat auch positive Seiten: Sie bedeutet, dass in einer Welt mit Quantencomputern nur bestimmte kryptografische Kodes geknackt werden können, während andere wahrscheinlich sicher bleiben. Sie erhöht unsere Gewissheit, dass Quantencomputer überhaupt möglich sind – denn je mehr eine Zukunftstechnik einer Sciencefiction-Karikatur ähnelt, desto skeptischer sollten wir sein. Wem würden Sie eher glauben: dem Verkäufer, der ein Gerät anpreist, dass unbegrenzt Energie aus dem Quantenvakuum erzeugt, oder dem, der einen Kühlschrank anbietet, der weniger Strom verbraucht als das Vorjahresmodell? Und schließlich garantiert diese Beschränkung, dass die Informatiker bei der Entwicklung neuer Quantenalgorithmen ein klar umrissenes Arbeitsfeld vorfinden. Wie Achilles ohne seine Ferse, Siegfried ohne verwundbares Schulterblatt oder Superman ohne Kryptonit würde ein Computer ohne Grenzen ziemlich schnell langweilig. ◁

JASON DORFMAN

Scott Aaronson ist Dozent für Elektrotechnik und Computerwissenschaft am Massachusetts Institute of Technology. Ohne Highschool-Abschluss machte er an der Cornell University den Bachelor und promovierte in Informatik an der University of California in Berkeley; sein Doktorvater war Umesh Vazirani. Aaronson betreut einen viel gelesenen Weblog (www.scottaaronson.com/blog) und schuf den Komplexitätszoo (www.complexityzoo.com), eine Online-Enzyklopädie mit über 400 Komplexitätsklassen.

Aaronson, S.: NP-Complete Problems and Physical Reality. In: ACM SIGACT News, Complexity Theory Column 36(1), S. 30 – 52, 2005.

Mermin, N. D.: Quantum Computer Science: An Introduction. Cambridge University Press 2007.

Nielsen, M. A., Chuang, I. L.: Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/957499.

DIGITALES RÖNTGEN

Scharfer Blick in den Körper

Der Röntgenfilm hat bald ausgedient, digitale Bildverarbeitung zieht in die Praxen der Radiologen ein.

Von Stefanie Reinberger und Mark Fischetti

Während Magnetresonanz- und Computertomografie voll und ganz auf digitale Bildverarbeitung setzen, arbeiten die Urväter der Bildgebung, die klassischen Röntgengeräte, meist noch immer analog. Seit etwa zehn Jahren stehen auch hier digitale Systeme zur Verfügung. »Mittlerweile arbeiten rund 30 Prozent der Facharztpraxen mit Geräten für digitales Röntgen, in Kliniken ist der Anteil sogar noch deutlich höher«, erklärt Jörg Szymanski, Geschäftsführer der Firma DIX Ray Solution in Brühl. Nach seiner Prognose werden analoge Systeme in den nächsten fünf Jahren weit gehend von der Bildfläche verschwinden.

Beide Verfahren »durchleuchten« den Körper eines Patienten mit Röntgenstrahlen. Deren Energie wird von den verschiedenen Geweben je nach Dichte unterschiedlich stark absorbiert. Die Energieverteilung der aus dem Körper wieder austretenden Strahlen enthält deshalb Informationen über die Gewebestruktur. Um sie sichtbar zu machen, muss herkömmlicherweise ein Röntgenfilm belichtet und entwickelt werden.

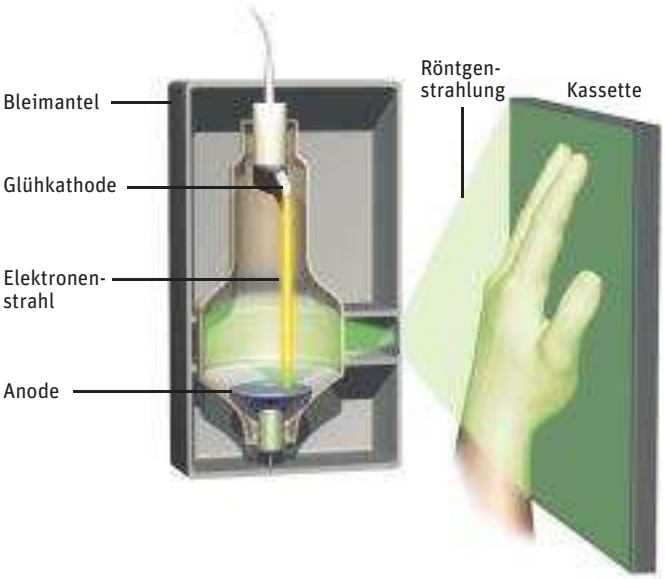
Digitales Röntgen kommt ohne Film aus, damit auch ohne Chemikalien. Ihn ersetzen beispielsweise Kunststofffolien mit einer Beschichtung aus Phosphor oder bestimmten Halbleitern. Bei der Bestrahlung werden die Elektronen dieser Materialien aus ihrem Grundzustand auf höhere Energieniveaus versetzt. Sie bleiben dort, bis sie mit einem Rotlichtlaser »ausgelesen« werden. Dann kehren sie in den Ausgangszustand zurück, dabei wird die Anregungsenergie als sichtbares Licht frei. Andere Systeme arbeiten mit Szintillatoren, also Materialien wie Cäsiumjodid, die den letzten Schritt spontan, ohne Laserbelichtung vollziehen. Das Ergebnis beider Methoden: Das sichtbare Licht trägt nun die in der Verteilung der Röntgenintensität enthaltene Information. Photodetektoren messen es und erzeugen, ähnlich den Chips einer Digitalkamera, ein Raster von elektrischen Spannungswerten – das digitale Bild. Bestehen diese Sensoren aus amorphem Selen, wird es noch einfacher, denn solche Photodetektoren können Röntgenstrahlung ohne Zwischenschritt in elektrische Ladung umwandeln.

Die Kosten digitaler Röntgensysteme sind derzeit noch höher als die analoger. Während eine Filmentwicklungseinheit auf Chemiebasis für rund 8000 Euro angeboten wird, schlägt die digitale Bildgebung je nach Technologie mit zirka 40 000 bis 140 000 Euro zu Buche. Dazu kommen je nach Einsatzgebiet noch weitere Kosten etwa für spezielle Software. Dennoch lohnt sich die Anschaffung, wie Szymanski betont: »Beim analogen Röntgen fallen Verbrauchskosten für Filme und Chemikalien an, die sich im Jahr auf 8000 bis 12 000 Euro belaufen – das alles entfällt. Hinzu kommen Zeit- und Personalersparnis.« Laut Szymanski rechnet sich der Erwerb einer digitalen Einheit für eine Facharztpraxis daher schon nach spätestens drei Jahren.

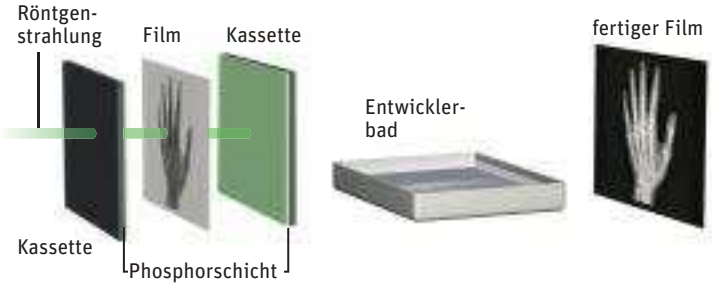
Zudem erspart die neue Technik den Patienten Wartezeit, denn die Bilder erscheinen sofort auf einem Monitor, lassen sich besprechen und auswerten beziehungsweise per Internet in andere Praxen oder Kliniken verschicken. Auch das Archivieren ist einfacher und platzsparender als beim Film. Was aber noch viel wichtiger ist: Die Digitaltechnik erlaubt ein Nachbearbeiten der Aufnahmen. Kontrastverstärkung macht mitunter Tumoren besser sichtbar, zu schwach belichtete oder unscharfe Bilder lassen sich optimieren, so dass die Aufnahme nicht wiederholt werden muss – und dem Patienten somit eine neuerliche Strahlenbelastung erspart bleibt.

Stefanie Reinberger ist promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg, **Mark Fischetti** Redakteur bei »Scientific American«.

RÖNTGENGERÄT Aus einer Glühkathode austretende Elektronen werden durch Hochspannung zur Anode beschleunigt, der Aufprall setzt energiereiche Photonen von etwa zehn Nanometer (millionstel Millimeter) Wellenlänge frei (zum Vergleich: das Spektrum sichtbaren Lichts reicht von 400 bis 750 Nanometer).



ANALOG



ANALOGE TECHNIK Eine fluoreszierende Schicht absorbiert die Röntgenstrahlen, ihr Leuchten belichtet den Film. Dieser muss in einer Dunkelkammer entwickelt werden.

Wussten Sie schon?

▶ **Mehrere Aufnahmen** aus verschiedenen Perspektiven beziehungsweise von unterschiedlichen Ebenen lassen sich zu einer dreidimensionalen Darstellung verrechnen. Das Prinzip ähnelt der Computertomografie (CT), bei der eine Röntgenröhre um den Patienten herumfährt, der Computer aus den Messwerten exakte Schnittbilder und daraus gegebenenfalls räumliche Darstellungen errechnet. Das Verfahren ist beim digitalen Röntgen viel einfacher, erreicht aber längst nicht die Exaktheit des CTs. Für Routineuntersuchungen ist es noch nicht im Einsatz.

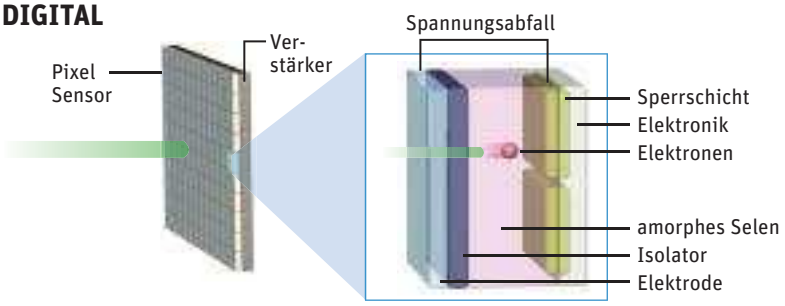
▶ **Chirurgen nutzen eine kontinuierliche Durchleuchtung**, Fluoroskopie genannt, um sich beispielsweise beim Einführen von Kathedern in Blutgefäßen zu orientieren oder um dynamische Vorgänge im Körper wie das Entleeren des Mastdarms zu beobachten. Die zwangsläufig schwache Strahlung erfordert einen Bildverstärker, der sperrig ist und den Zugang zum Patienten erschwert. Moderne digitale Geräte kommen nicht nur ohne Verstärkung aus, sie machen auch schärfere Aufnahmen.

▶ **Röntgen ohne Dunkelkammer,** das bedeutet Mobilität und Platzersparnis. Die neue Technik eignet sich deshalb prinzipiell für Unfallärzte ebenso wie für die schwimmende Arztpraxis auf Kreuzfahrtschiffen. Tiermediziner nutzen mobile Röntgengeräte bereits – für die Diagnostik im Stall.

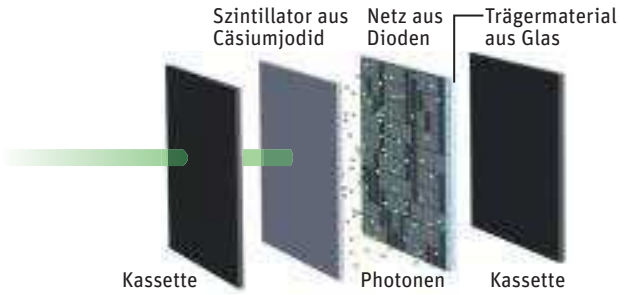
▶ **Auch die Gepäckkontrolle am Flughafen** arbeitet mit einer kontinuierlichen Durchleuchtung. Bei digitalen Systemen erzeugen Hochenergie-Röntgenstrahlen eine Serie von Bildern aus verschiedenen Blickrichtungen, so dass eine räumliche Darstellung des Inhalts von Koffern und Taschen möglich ist. Einzelne Objekte lassen sich voneinander abgrenzen und mit einer Datenbank abgleichen.

GEORGE RETSECK

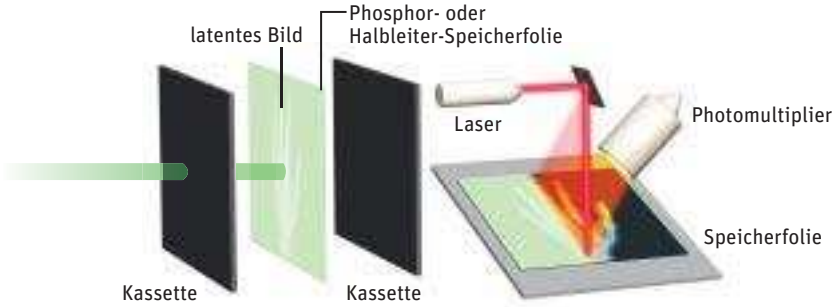
DIGITAL



DIREKTE BILDGEBUNG Ein Raster aus Photodetektoren wandelt die Röntgenstrahlen in elektrische Ladungen um, die verstärkt und als digitales Bild dargestellt werden.



INDIREKTE BILDGEBUNG Durch Strahlung angeregt sendet ein Szintillator sichtbares Licht aus. Das wiederum wird von Fotodioden gemessen.

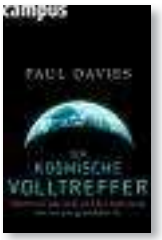


SPEICHERFOLIENTECHNIK Röntgenstrahlen bringen Elektronen einer Folie auf ein höheres Energieniveau. Laserlicht kehrt den Vorgang um, dabei wird Licht frei.

KOSMOLOGIE

Glaubensbekenntnisse eines Physikers

Paul Davies erklärt uns, wie Gott den Kosmos und das Leben schuf.



Paul Davies ist ein produktiver Autor. Bis heute hat er es auf mindestens 27 Sachbücher gebracht, daneben zahllose Zeitschriftenbeiträge (zum Beispiel Spektrum der Wissenschaft 4/2008, S. 42), Herausgeberwerke, Fernsehserien und natürlich eine Fülle von Fachartikeln. Denn eigentlich ist der Brite, der heute an der Arizona State University lehrt, auch ein ernsthafter Wissenschaftler, der sich mit Kosmologie, Quantenfeldtheorie und Astrobiologie beschäftigt.

Blickt man etwas näher hin, so gewinnt man jedoch den Eindruck, dass Davies immer wieder das gleiche Buch schreibt, nämlich über »Gott und Welt«, genauer: über die Beziehung von Kosmologie, Teilchenphysik und Religion. Das muss kein Schaden sein. Denn die ersten beiden Themen entwickeln sich so rasant, dass es immer wieder Neues zu berichten gibt; und prominente Vertreter der Religion reiben sich stets aufs Neue an Themen wie der Evolutionstheorie oder der Urknallforschung.

Bei einer derart intensiven Auseinandersetzung mit diesen Grenzbeziehungen ist es nicht verwunderlich, dass Davies 1995 den Templeton-Preis erhielt, der sich »dem Fortschritt in Richtung von Forschung oder Entdeckungen spiritueller Realitäten« widmet. Die Templeton-Stiftung steht unter dem Verdacht, eine Art kreationistischer Geheimagentur zu sein; aber wohlgemerkt: Der Templeton-Preis an sich kennzeichnet seinen Empfänger noch keineswegs als unseriös.

Die These, dass »das Universum wie für uns geschaffen ist«, firmiert seit Längerem als das »Anthropische Prinzip« (AP; siehe Spektrum der Wissenschaft 2/1982, S. 90). In seiner »schwachen« Version besagt es, dass das Universum mit der Tatsache unserer Existenz kompatibel sein muss. Nur in der »starken« Variante behauptet es, der Kosmos und seine Naturgesetze seien so gebaut, dass darin unweigerlich intelligentes Leben entstehen müsse. Über das AP hat Davies bereits 1982 das Buch »The Accidental Universe« herausgebracht und seither in weiteren Büchern – »Der Plan Gottes«, »Kann alles Zufall sein?«, »Die Unsterblichkeit der Zeit. Die moderne Physik zwischen Rationalität und Gott« – diskutiert. In seinem »Kosmischen Volltreffer« steht es jetzt abermals im Mittelpunkt.

Während die schwache Version eher nach einer Binsenweisheit klingt, wurde das starke AP schon bald als »religiöser Humbug« bespöttelt, wie Davies in seinem Vorwort etwas bitter vermerkt. Aber nun sieht er das »Prinzip« weit gehend rehabilitiert, vor allem, seit Stringtheoretiker über Multiversen spekulieren und sich unser Universum samt seinen Naturgesetzen nur als eines unter zahllosen gleichfalls existierenden vorstellen. Umso mehr freut sich der Autor über den »glücklichen Zufall, dass in unserem Universum Leben möglich ist«.

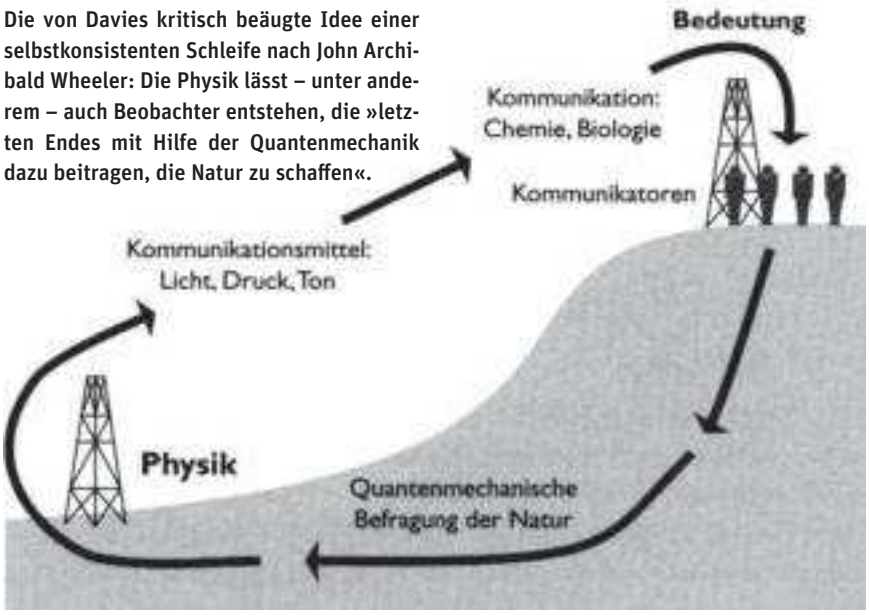
Während Davies die »großen Fragen« der modernen Kosmologie wie auch der Teilchenphysik schildert, mischt er immer wieder, nicht immer passend, die Gottesfrage dazwischen. Für denjenigen, den das auf die Dauer nervt, hat er ans Ende seines Buchs ein Nachwort mit »Ultimativen Erklärungen« gestellt. Die sind nun wirklich kompakt und hilfreich. Auf zehn Seiten fasst er nämlich die wichtigsten Deutungsthesen über die Welt zusammen, vom »absurden Universum« (das er für absurd hält), dem »einzigen und einmaligen Universum« (das er auch nicht mag) über »Intelligentes Design« (von dem er sich distanziert) und das »Lebensprinzip« bis zum »sich selbst erklärenden Universum«. Nur die beiden letzten Thesen finden seine Gnade, denn: »Vielleicht wird das Sein nicht von ›außen‹ geschenkt, indem einer ›Möglichkeit‹ von einer unbekannten Agentur (also von transzendenten Seins-Erzeugern) der ›Odem eingehaucht‹ wird, sondern es ist auch etwas, das sich selbst aktiviert. Ich bin der Ansicht, dass nur selbstkonsistente Schleifen in der Lage sind, sich selbst zu verstehen und zu erschaffen, weswegen nur Universen mit … Leben und Geist wirklich existieren.«

Diese Thesen geben Davies denn auch Raum für persönliche Glaubensbekenntnisse: »Mir scheint, dass es einen echten Plan der Dinge gibt … Mag sein, dass das eine Art religiöse Überzeugung darstellt.« Dagegen wäre nichts zu sagen, schließlich kann jeder glauben, was er für richtig hält. Wer jedoch ein reines Sachbuch über den aktuellen Stand der Kosmologie und Quantenphysik erwartet, wird nur zum Teil auf seine Kosten kommen. Dagegen ist das Buch eindeutig an Leser gerichtet, die schon immer wussten, dass der große Uhrmacher die Welt mitsamt ihren lebenden und toten Inhalten hervorgebracht hat.

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist habilitierter Physiker und Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«.

Die von Davies kritisch beäugte Idee einer selbstkonsistenten Schleife nach John Archibald Wheeler: Die Physik lässt – unter anderem – auch Beobachter entstehen, die »letzten Endes mit Hilfe der Quantenmechanik dazu beitragen, die Natur zu schaffen«.



Paul Davies
Der kosmische Volltreffer
Warum wir hier sind und das Universum wie für uns geschaffen ist

Aus dem Englischen von Carl Freytag.
Campus, Frankfurt am Main 2008.
372 Seiten, € 24,90

BIOGRAFIE

Amundsen, wie er wirklich war

Tor Bomann-Larsen zeichnet ein ungeschöntes Bild des Roald Amundsen – von seiner Faszination büßt der Bezwinger beider Pole dadurch aber nichts ein.

Die Biografie des Mannes, der als Erster zum Südpol vorstieß, zeigt auf dem Umschlag vermummte Männer im Schnee – aber Roald Amundsen (1872–1928) ist nicht dabei! Vor dem Zelt, das der norwegische Pionier samt Landesfahne am Pol zurückgelassen hatte, stehen, zu spät gekommen und sichtlich konsterniert, sein Widersacher Robert Falcon Scott und dessen Gefährten, die allesamt nicht mehr aus dem Eis zurückkehrten.

Der Sinn dieser merkwürdigen Bildwahl erschließt sich bei der Lektüre des Buchs. Der norwegische Journalist Tor Bomann-Larsen hält nichts von unkritischer Heroisierung. Deshalb hat er bewusst auf jenes inszenierte Bild verzichtet, das die Expeditionsteilnehmer um Amundsen trotz Eiseskälte barhäuptig vor der norwegischen Flagge am Südpol zeigt.

Der Polarforscher verstand es wie kaum ein Zweiter, sein Privatleben abzuschirmen und der Öffentlichkeit nur solche Einblicke zu gewähren, die seinem Ruf als Helden zuträglich waren. Eine gründliche Quellensuche fördert jedoch etliche Widersprüche zwischen der öffentlichen Scheinwelt, die Amundsen inszenierte, und der Wirklichkeit zu Tage.

Ein Zufallsfund brachte den Autor auf die richtige Spur: Auf einem Dachboden in Oslo stieß er auf einen verstaubten Koffer mit etlichen Originaldokumenten. Weiteres bislang ungenutztes Material entdeckte er im Archiv des Norwegischen Polarinstituts. Auf Basis dieser Quellen sowie umfangreicher Primär- und Sekundärliteratur entwickelt Bomann-Larsen ein glänzend recherchiertes Charakterbild Amundsens: Egoistisch, selbstgerecht, herrisch – so hat man ihn noch nicht gekannt.

Dem Wunsch seiner Mutter folgend, begann ihr jüngster Sohn Roald 1890 in Kristiania (heute Oslo) Medizin zu studieren – allerdings nur zum Schein, denn sein Entschluss, Polarforscher zu werden, stand längst fest. Der Traum, als großer Entdecker in die Geschichtsbücher der Welt einzugehen, war das Leitmotiv all seiner Handlungen – und die beiden Pole waren die einzigen größeren noch weißen Flecken auf der Landkarte der Erde. Um seiner Mutter die Wahrheit zu sagen, war er wohl schlicht zu feige – musste er doch obendrein um ihre finanziellen Zuwendungen fürchten.

In Vorbereitung auf die zu erwartenden Strapazen im Eis schlief er nachts bei offenem Fenster und übte sich in körperlicher Ertüchtigung. Auf seine physische Verfassung war er zeit seines Lebens stolz, wobei er aber seine Sehschwäche geflissentlich verschwieg.

Nach dem Tod seiner Mutter heuerte er auf einem belgischen Forschungsschiff an, das ihn erstmals in die Antarktis führte. Seine erste eigene Expedition als Kapitän unternahm er auf den Spuren seines großen Vorbilds, des englischen Admirals John Franklin, der 1847 auf der Suche nach der Nordwestpassage vor der King-William-Insel ums Leben gekommen war. Der Entdeckung jenes legendären Seewegs, der Atlantik und Pazifik nördlich des amerikanischen Kontinents verbindet, war die wissenschaftliche Erforschung dieser Gebiete als Expeditionsziel zwar offiziell gleichgestellt, doch gab sich Amundsen mit der lästigen Datenerhebung erst gar nicht ab und überließ sie stattdessen seinem treuen Gefährten Gustav Wiik. Wie bei allen späteren Missionen diente die Forschung nur als Vorwand für seine eigentlichen Vorhaben, weil sich die stets benötigten öffentlichen Gelder unter dem Deckmantel der Wissenschaft leichter beschaffen ließen.

Gegenüber seiner Mannschaft führte Amundsen während seiner Expeditionen ein strenges Regiment: Alle Mitglieder hatten sich seinen Wünschen und Zielen unterzuordnen – was durch seinen schwierigen Charakter, vor allem während der jahrelangen Isolationen im Eis, zusätzlich erschwert wurde. Wie zum Dank fühlte sich der Polwanderer denn aber auch sein Leben lang dem Wohl seiner Gefährten verpflichtet – außer jemand wagte es, dem »Chef« zu widersprechen. In solchen Fallen waren auch Kündigungen mitten im Eis nicht ausgeschlossen. Seine Unfähigkeit, Kritik hinzunehmen, bekam später sogar sein Bruder, Geschäftsführer und engster Vertrauter Leon Amundsen zu spüren, mit dem er sich wegen Finanzfragen überwarf und einen jahrelangen Streit vor Gericht ausfocht.

Schon Amundsens erste Expedition war ein voller Erfolg: Als erster Mensch durchquerte er die Nordwestpassage und sammelte während der Durchfahrt wertvolle wissenschaftliche Daten. Das beeindruckte vor allem den international anerkannten Polarforscher Fridtjof Nansen, der sich mit dem Forschungsschiff »Fram« mehrere Jahre

Roald Amundsen (links) wurde 1913 in New York zusammen mit Admiral Robert E. Peary (rechts), dem offiziellen Entdecker des Nordpols, und dem Polarforscher Ernest H. Shackleton gefeiert.

Die Brüder Amundsen (links): vorn Busken und Leon, dahinter Tonni und Roald, Uranienborg 1918. Rechts Roald Amundsen auf »Staatsbesuch« in Japan 1927

lang im Eis hatte einschließen und mittreiben lassen. Mit dem wissenschaftlichen Erfolg im Rücken gelang es Amundsen, dem auch als Diplomaten aktiven Nansen die »Fram« für seine nächste Expedition abzuschwatzen: Er wollte sich »von den Polarströmen über den Nordpol treiben lassen und das Polarmeer erforschen«. Geblendet vom vorgespielten wissenschaftlichen Enthusiasmus seines Landsmanns verzichtete Nansen schließlich auf sein moralisches Vorgriffsrecht. Nun schien es, als sei Amundsen der Pol nicht mehr zu nehmen.

Doch noch während der Vorbereitungen erreichte ihn die überraschende Nachricht, dass die Position 90 Grad Nord bereits erreicht worden war. Ob es Amundsens alter Weggefährte Frederick Cook oder der Amerikaner Robert Peary oder überhaupt einer von beiden geschafft hatte, daran bestehen heute berechtigte Zweifel. Für Roald Amundsen war jedenfalls klar, dass der Weg in die Geschichtsbücher nur noch über den Südpol führte. Die Zeit drängte: Auch der Brite Robert Scott bereitete eine Expedition in die Antarktis vor, während Amundsen für die nächsten Jahre eigentlich im Nordpolarmeer verplant war.

Höchste Zeit für Amundsens Meisterstück der Täuschung: In aller Stille plante er den Marsch durch das ewige Eis – bis ins letzte Detail: Sogar den allmählichen Verzehr der Schlittenhunde kalkulierte er mit ein. Offiziell war die »Fram« bei ihrer Abfahrt aus Kristiania noch immer in Richtung Norden unterwegs. Umso heftiger fielen dann die Reaktionen aus, als Amundsen die Öffentlichkeit von Madeira aus schriftlich über seinen Kurswechsel informierte.

Nach seiner Rückkehr machte Amundsen den Flugschein und versuchte alsbald, mit dem Flugzeug noch Land im hohen Norden zu finden. Dass er mitsamt seinen Leuten einen Absturz überlebte und das Gerät aus eigener Kraft wieder flottmachte, war zwar eine bemerkenswerte Leistung, aber auch der einzige Erfolg dieser Unternehmung. In einer norwegisch-amerikanisch-italienischen Mission segelte Amundsen dann doch noch gemeinsam mit dem Italiener Umberto Nobile an Bord des Luftschiffs »Norge« über den Pol hinweg – doch Land war nirgends in Sicht.

Gewiss, in seiner Biografie schildert Tor Bomann-Larsen den Norweger distanziert als schwierigen Charakter, der stets seinen eigenen Vorteil im Blick hatte. Dennoch vermag die kritische Perspektive die Faszination, die von diesem Menschen ausgeht, nicht zu schmälern. Im Gegenteil: Das Buch beschreibt die Rastlosigkeit seines Helden, den die Sucht nach Ruhm und Ehre stets aufs Neue ins Eis hinaustrieb, ebenso wie sein kompliziertes Verhältnis zum anderen Geschlecht, insbesondere zu verheirateten Frauen.

Sein letzter Trip im Jahr 1928 wirkt deshalb fast wie eine Flucht, war seine Herzensdame doch schon auf dem Weg aus den USA nach Norwegen, als Amundsen dem Notruf seines ihm fremd gewordenen Partners Umberto Nobile folgte, der in der Arktis festsaß. Per Flugzeug machte sich der Norweger auf die Suche – und kehrte nicht mehr zurück. Sein Einsatz machte den zuletzt in die Kritik geratenen Roald Amundsen erst recht unsterblich – rückte er ihn doch in eine Linie mit Scott und Franklin, den Märtyrern im Eis.

Christoph Marty

Der Rezensent studiert Wissenschaftsjournalismus in Dortmund.

Tor Bomann-Larsen
Amundsen
Bezwinger beider Pole

Aus dem Norwegischen von
Karl-Ludwig Wetzig.
Mare Buchverlag, Hamburg 2007.
703 Seiten, € 29,90

PHYSIK

Quantenphysik häppchenweise

Valerio Scarani führt seine Leser behutsam durch die seltsame Welt der Quanten – fundiert und dennoch leicht verdaulich.

Wenn zu Beginn der Autor und sein Freund, der Philosophiedozent Jean-Paul Fragnière, die im Collège Saint-Michel in Fribourg (Schweiz) in den Hörsaal strömenden Studenten begrüßen, könnte man glauben, man sei in einem belletristischen Buch gelandet. Aber das gibt sich schnell: Plötzlich befindet man sich mitten in einer Vorlesung über Quantenphysik.

Auf dem Lehrplan steht zunächst Interferometrie. Ein Licht- oder Partikelstrahl wird mit Hilfe von Strahlteilern auf verschiedene optische Wege geleitet, die sich am Ende wieder vereinen. Das Experiment bringt unter bestimmten Bedingungen absolut unerklärliche Ergebnisse hervor: Wenn ein Teilchen zwei verschiedene Wege zu einem Detektor zur Verfügung hat und nicht messbar ist, welchen es nimmt, ist sein Verhalten von dem Längenunterschied der beiden Wege bestimmt. Es sieht so aus, als würde jedes einzelne Partikel alle möglichen Alternativen erkunden.

Diese so genannte Ein-Teilchen-Interferenz ist nur der Einstieg in die Quantenwelt, deren abstruse Regeln sich so überhaupt nicht mit unserer Intuition decken. In einem System aus zwei Teilchen scheint das Verhalten der beiden auf seltsame Weise korreliert – und das unabhängig von ihrer Entfernung (»Quantenverschränkung«). Die Interpretation dieses Experiments war heftig umstritten. Neben zahlreichen anderen Skeptikern war auch Albert Einstein eher bereit, an die Unvollkommenheit der Theorie zu glauben als an eine »spukhafte Fernwirkung«.

Valerio Scarani ordnet die von ihm vorgestellten Phänomene in den historischen Kontext ein und widmet sich auch aktuellen Experimenten und Entwicklungen. Darüber hinaus präsentiert er dem Leser potenzielle Anwendungen wie die Quantenkryptografie, mit der Nachrichten dank der seltsamen Gesetze abhörsicher übertragen werden können, oder die Quantenteleportation. Hier verschwinden die Eigenschaften eines Teilchens an einem Ort und tauchen an einem anderen wieder auf. Aber so wunderlich die Quantenphysik auch ist – die Teleportation von Materie lässt selbst sie nicht zu.

Überhaupt sind Wissenschaftler heutzutage findig darin, sich die eigenwillige Physik der Quanten zu Nutze zu machen, doch über deren Interpretation herrscht nach wie vor große Uneinigkeit. Wie passen derartige Phänomene in unsere vom Alltag geformte Sicht der Natur? Diese Frage kann auch der Autor nicht beantworten, es bleibt ihm nur, aus einem riesigen Repertoire mehrere Vorschläge vorzustellen und den Leser auf die – reichlich zitierte – weiterführende Literatur zu verweisen.

Scarani ist Professor an der National University of Singapore und erforscht gemeinsam mit seinen Kollegen den möglichen Einsatz der Quantenphysik in der In-

Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnentennummer unter **www.spektrum-plus.de** Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:

Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Urwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg / Dynamikum, Science Center, Pirmasens

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

Spektrum DER WISSENSCHAFT Wissen aus erster Hand

www.spektrum-plus.de

formationsverarbeitung. Da wäre es ihm sicher ein Leichtes, dem Leser den komplizierten mathematischen Formalismus darzulegen. Aber er verschont uns und bringt stattdessen klare Grafiken und eingängige Beispiele.

Zum Verständnis sind keine außerordentlichen Physikkenntnisse erforderlich, wohl aber passagenweise Konzentration und Geduld. Dies trifft vor allem auf die Erläuterung der bellschen Ungleichung zu – ein mathematisches Theorem, mit Hilfe dessen experimentell nachgewiesen werden kann, dass Quantenverschränkungen nicht an der Quelle erzeugt werden, dass die beiden Teilchen sich also nicht deshalb korreliert verhalten, weil ihnen die später gemessenen Eigenschaften schon bei ihrer Erzeugung mitgegeben wurden. Allerdings serviert der Autor leserfreundlich gleich vorab die Kernaussage und überlässt es jedem selbst, sich dieses schwierigen Kapitels anzunehmen.

»Physik in Quanten« ist kein Buch, das lediglich die skurrilen und sensationellen Aspekte der Quantenphysik aufzeigt. Auf nur 115 Seiten gelingt es Scarani, das Wesentliche darzustellen – selbst wenn in diesem Umfang, wie er immer wieder betont, nur ein winziger Ausschnitt dieses weiten Felds behandelt werden kann.

Maike Pollmann

Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Hamburg.

Valerio Scarani
Physik in Quanten
Eine kurze Begegnung mit Wellen, Teilchen und den realen physikalischen Zuständen

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer.
Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 2007. 140 Seiten, € 16,50

BEWUSSTSEINSFORSCHUNG

Ermüdende Erweckung

Der alte Zauberkünstler Daniel Dennett entlarvt eine Bewusstseinsphilosophie nach der anderen als hohl – nur ein bisschen zu oft.

Der amerikanische Philosoph Daniel Dennett liebt es, zu provozieren; aber die Fachkollegen durch die Bank als Schlafmützen zu bezeichnen, bleibt dem deutschen Untertitel vorbehalten. Im Original heißt es recht seriös: »Philosophische Hindernisse für eine Wissenschaft des Bewusstseins«. Das Buch dreht sich vor allem um die Frage, ob naturwissenschaftliche Erklärungen ausreichen, das Wesen psychischer Erlebnisse wie Farbe, Schmerz und Ich-Bewusstsein zu erfassen.

Dennett meint: Ja. Da er gern provoziert, bezeichnet er sich keck als Materialist, während man hier zu Lande ähnliche Positionen lieber mit dem ideologisch weniger belasteten Terminus Naturalismus umschreibt. Jedenfalls ist so jemand davon überzeugt, dass uns alles Wissenswerte über die Welt mit den Mitteln der empirischen Wissenschaften zugänglich ist. Besondere geistige Substanzen, die man nicht messen und wägen kann, werden nicht gebraucht.

Dieser Standpunkt erregt heutzutage unter Wissenschaftlern kaum mehr als ein Achselzucken, und sogar viele Philosophen würden ihn tolerieren – solange nur von der großen, weiten Welt da draußen die Rede ist und nicht von unserem eigenen Innenleben. Doch genau dorthin dringt die moderne Naturwissenschaft in Gestalt der Hirnforschung vor und tastet unser Eingemachtes an. Und damit hört für viele Philosophen der Spaß endgültig auf.

Sie wiederholen dabei im Grund immer nur ein Argument, das Gottfried Wilhelm Leibniz schon Ende des 17. Jahrhunderts vorgebracht hat: Angenommen, wir könnten uns ganz klein machen und zwischen den mikroskopischen Bausteinen des Gehirns umherspazieren; da würden wir zwar interessante physikalisch-chemische Vorgänge aus der Nähe beobachten können, aber gewiss keine Farben und Gerüche, keine Schmerzen und Erinnerungen. Voilà, Messieurs, damit ist bewiesen, dass der Geist sich nicht auf Physik und Chemie reduzieren lässt!

Mit diesem Argument und seinen vielen Abkömmlingen hat Dennett sich schon 1991 in seinem Hauptwerk mit dem provokanten Titel »Consciousness Explained« (deutsch brav als »Philosophie des menschlichen Bewusstseins« erschienen) tapfer herumgeschlagen, und im vorliegenden Buch liefert er seinen Kritikern elegante Nachgefechte. Dabei zieht er ein plastisches Bild stets einer umständlichen Beweisführung vor; Gelächter im Publikum und Applaus für eine gelungene Pointe sind ihm lieber als erschöpfendes Begriffsgeplänkel. Damit garantiert er dem Leser jedenfalls – mit einer kleinen Einschränkung, siehe unten – unerwartet gute Unterhaltung.

Bei ruhigem Nachdenken fühlt man sich zwar von Dennetts Tricks manchmal über den Zaubertisch gezogen, aber ich nehme ihm das nicht übel, denn seine Gegner arbeiten auch nicht gerade mit sauberen Methoden. John Searle erfindet ein »Chinesisches Zimmer«, in dem jemand, der kein Wort Chinesisch kann, dennoch eine perfekte Übersetzungsmaschine simuliert. Frank Jackson denkt sich eine Wissenschaftlerin aus, die alles über Farben weiß, obwohl sie noch nie eine gesehen hat. Thomas Nagel fragt sich und uns, wie es sich wohl anfühlt, eine Fledermaus zu sein. Beliebt sind auch Zombies, das heißt Wesen, die sich genau wie wir Menschen verhalten, nur ohne eine Spur Bewusstsein. Solche Gedankenspiele nennt Dennett Intuitionspumpen: Sie geben uns die Illusion, das Problem des Bewusstseins sei unlösbar, und produzieren doch nur trügerische heiße Luft.

Jedenfalls ist es sehr unterhaltsam und obendrein lehrreich, Dennett zuzusehen, wie er einen dieser Ballons nach dem anderen zum Platzen bringt. Nur macht der philosophische Zauberkünstler einen großen Fehler: Er geht nicht rechtzeitig von der Bühne. Gegen Ende des Buchs, eigentlich eine Sammlung verstreuter Aufsätze, häufen sich Wiederholungen – und ein wiederholter Scherz ist ein müder. Aber trotzdem, wir wollen nicht so sein: Applaus, Applaus.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Daniel Dennett
Süße Träume
Die Erforschung des Bewußtseins und der Schlaf der Philosophie

Aus dem Amerikanischen von Gerson Reuter.
Suhrkamp, Frankfurt am Main 2007.
216 Seiten, € 24,80

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

VORSCHAU

Heft August 2008
ab 29. Juli im Handel

Kosmische Ursprünge für den Pfeil der Zeit

Warum laufen alle Prozesse von der Vergangenheit in die Zukunft? Dies könnte sich nach Ansicht von Kosmologen dadurch erklären, dass unser Universum Teil eines übegeordneten Multiversums ist

KENN BROWN

WEITERE THEMEN IM AUGUST

Superstoff aus dem Bleistift

Jeder Bleistiftstrich enthält kleine Mengen eines Stoffs, der zum Aufregendsten zählt, was es heute in der Nanotechnologie gibt: Graphen

Afrikas Sonderweg

In Westafrika begann die Jungsteinzeit möglicherweise viel früher als andernorts. Das lassen 11 500 Jahre alte Keramiküberreste vermuten

Winterschlaf der Pferde

Prschewalskipferde sind für das Leben in ihrer Urheimat Mongolei gut gerüstet – vor allem für die langen, lausig kalten Winter

REGINA KUNTZ

Räumkommando macht Krebs verwundbar

Wirkstoffe, die das Wirrwarr der Blutgefäße in einem Tumor ordnen, verschaffen Krebsmedikamenten einen gezielteren Zugang zum Krankheitsherd

KEITH KASNOT

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter